



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojírenské technologie

Studijní rok: 2004/2005

Studijní program **M 2301 Strojní inženýrství**

Obor **2303T002 Strojírenská technologie**

Zaměření **Strojírenská metalurgie**

Sledování rozměrových změn během tuhnutí odlitků ze slitin hliníku

Monitoring the dimensional changes of castings from Al alloys

Mariusz KRAJEWSKI

511

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Iva Nová, CSc – TU v Liberci

Konzultant diplomové práce: Ing. Zdeněk Hošek – TU v Liberci

Rozsah práce a příloh

Počet stran textu: 56

Počet tabulek: 9

Počet obrázků: 42

Datum: 27.5.2005



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojírenské technologie

Studijní rok: 2004/2005

ANOTACE

Studijní program: M2301 Strojní inženýrství
Diplomant: Mariusz KRAJEWSKI
Téma práce: Sledování rozměrových změn během tuhnutí odlitků ze slitin hliníku

Monitoring the dimensional changes of castings from Al alloys

Číslo DP: 511
Vedoucí DP: prof. Ing. Iva Nová, CSc – TU v Liberci
Konzultant: Ing. Zdeněk Hošek – TU v Liberci

Abstrakt:

Diplomové práce se zabývá sledováním dilatací během tuhnutí odlitku. Je zde použito speciálního měřicího zařízení. Toto zařízení umožňuje sledování hodnot dilatace a teplot při tuhnutí a chladnutí taveniny slitin Al-Si. Tyto hodnoty byly pomocí registrační jednotky změřeny a zaznamenány do počítače.

Pro tento experiment bylo odlito větší množství odlitků hliníkových slitin s různými obsahy křemíku. Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulky a dané závislosti vyneseny do grafů.

Další oblastí bylo vyhodnocování daných závislostí vynesených do grafů, zjišťování a popisování daných závislostí.

V závěru diplomové práce jsou zhodnoceny získané poznatky.



Abstract:

The diploma work concerns dilatation during of the cast solidification process. It was used a special measuring equipment, which enables to observe the values of dilatation and the temperatures during the solidification and cooling of Al-Si cast. These values were measured by registration unit and recorded to a computer.

For this experiment it was casted larger amount of aluminium casts with different contents of silicon. The measured values were recorded in the chart and following dependences in to the graphs. Other area of the work was evaluation of given dependences from graphs taking and describing these dependences.

At the end of the diploma work there are evaluated acquired information.



Prohlášení:

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

.....
Datum

.....
Mariusz KRAJEWSKI



P o d ě k o v á n í

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Ivě Nové a konzultantovi Ing. Zdeňku Hoškovi za ochotu, cenné rady a připomínky.

Rád bych také poděkoval svým rodičům, příbuzným a přátelům za jejich podporu po celou dobu mého studia.

OBSAH

Seznam použitých symbolů a zkratk.....	7
1. ÚVOD.....	8
2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE.....	9
2.1 Charakteristika hliníku a jeho slitin.....	9
2.1.1 Hliník.....	9
2.1.2 Slitiny hliníku	11
2.1.2.1 Slitina na bázi Al – Si.....	13
2.1.2.2 Slitina na bázi Al – Mg.....	15
2.1.2.3 Slitiny na bázi Al – Zn.....	15
2.1.2.4 Slitiny Al – Sn.....	15
2.1.2.5 Slitiny na bázi Al – Cu.....	16
2.1.2.6 Mechanické hodnoty slitin hliníku.....	16
2.1.2.7 Využití slitin hliníku v praxi.....	17
2.1.3 Způsoby lití.....	18
2.1.3.1 Lití do kovových forem.....	18
2.1.3.2 Gravitační lití.....	19
2.1.3.3 Lití pod tlakem.....	20
2.1.3.4 Nízkotlaké lití.....	21
2.1.3.5 Tlakové lití s pomocí vakua.....	22
2.1.3.6 Squeeze Casting nebo Squeeze Forming.....	23
2.2 Tuhnutí a chlazení odlitků.....	24
2.2.1 Průvodní jevy při tuhnutí odlitků.....	24
2.2.1.1 Tvoření staženin v odlitcích.....	24
2.2.1.2 Klasifikace dilatací a základní pojmy.....	25
2.2.1.3 Volné a brzděné dilatace tuhé fáze.....	27
2.2.1.4 Objemové změny při tuhnutí a chlazení odlitku.....	29
2.3 Krystalizace slévárenských slitin.....	30
2.3.1 Fázové přeměny při tuhnutí.....	30
2.3.2 Krystalizace kovů s slitin.....	30
2.3.2.1 Krystalizace hliníku a jeho slitin.....	32
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE.....	34
3.1 Popis měřicího zařízení pro sledování dilatací.....	34
3.2 Charakteristika použitých slévárenských forem.....	38
3.3 Popis prováděných měření dilatací.....	38
3.4 Vyhodnocení prováděných experimentů.....	40
3.4.1 Hodnocení průběhu tuhnutí.....	40
3.4.2 Hodnocení dilatací.....	45
3.4.3 Hodnocení staženin.....	52
4. DISKUSE VÝSLEDKŮ.....	53
5. ZÁVĚR.....	55
6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	56

Seznam použitých symbolů a zkratek

ε_{VL} - objemové smrštění kovu v tekutém stavu.....	[%]
ε_{VS} - objemové smrštění kovu v tuhém stavu.....	[%]
ε_V - relativní lineární smrštění tuhé fáze.....	[%]
ε_l - relativní lineární smrštění.....	[%]
α_{VL} - součinitel objemového smrštění v tekutém stavu.....	[K ⁻¹]
α_{VS} - součinitele objemového smrštění tuhém stavu.....	[K ⁻¹]
α_V - průměrný součinitel volné objemového smrštění tuhé fáze v rozmezí teplot ($T_1 - T_2$).....	[K ⁻¹]
α_l - koeficient volné tepelné lineární dilatace materiálu odlitku.....	[K ⁻¹]
T_1 - teplotu lití.....	[°C]
T_L - teplotu likvidu.....	[°C]
T_S - teplotu solidu.....	[°C]
V_1 - objem odlitku za teploty T_1	[m ³]
V_0 - objem odlitku za teploty T_0	[m ³]
l_1 - je rovnovážná (nenapjatá) délka určité části při teplotě T_1	[mm]
l_0 - rovnovážná délka téže části při teplotě T_0	[mm]

1. ÚVOD

Slévárenská výroba se neustále zaměřuje na výrobu kvalitních odlitků a to na kvalitu tvaru, povrchu a rozměrů, ale také na kompaktnost vnitřní struktury.

V podstatě odlitek není nikdy dokonalý, co se týče jeho velikosti a tvaru, a proto se na výkresech musí uvádět tolerance. ISO normy pro tolerance odlitků uvádějí, že ačkoliv různé technologie vykazují různé možnosti dosahovaných přesností, obecně platí, že nepřesnosti odlitků rostou se vzrůstajícím jmenovitým rozměrem.

Chyby rozměrů odlitků (tj. odchylky od nominálních hodnot) jsou dvojího typu: statistické a systematické. Statistické odchylky vznikají od nevyhnutelných malých odchylek proměnných v procesu a způsobují rozptyl výsledků obecně s normálním rozdělením okolo střední hodnoty.

Systematické odchylky posouvají maximální hodnotu rozdělení od nominální hodnoty k vyšším nebo nižším hodnotám. Tyto odchylky jsou způsobeny variacemi rozměrů modelu, ale hlavně plynou z nejistoty spojené s tolerancemi pro smrštění odlitku. To je dáno tím, že se berou hodnoty „čistého“ smrštění pro určitou slitinu bez ohledu na problematiku možných plastických deformací při brzděném smršťování atd.

Z tohoto důvodu je třeba smrštění věnovat určitou pozornost. Pro praktické použití, pak smrštění probíhajícímu při tuhnutí odlitků, které vede k příp. stanovení nálitků a tím výrobě odlitků bez vnitřních vad. K těmto materiálům se řadí i odlitky ze slitin hliníku, kterým je v současné době věnován výzkum na naší katedře - Strojírenské technologie TU Liberec.

Též úkolem mé diplomové práce je sledovat průběh tuhnutí, resp. lineárních změn při tuhnutí odlitků ze slitiny hliníku při určitých technologických podmínkách.

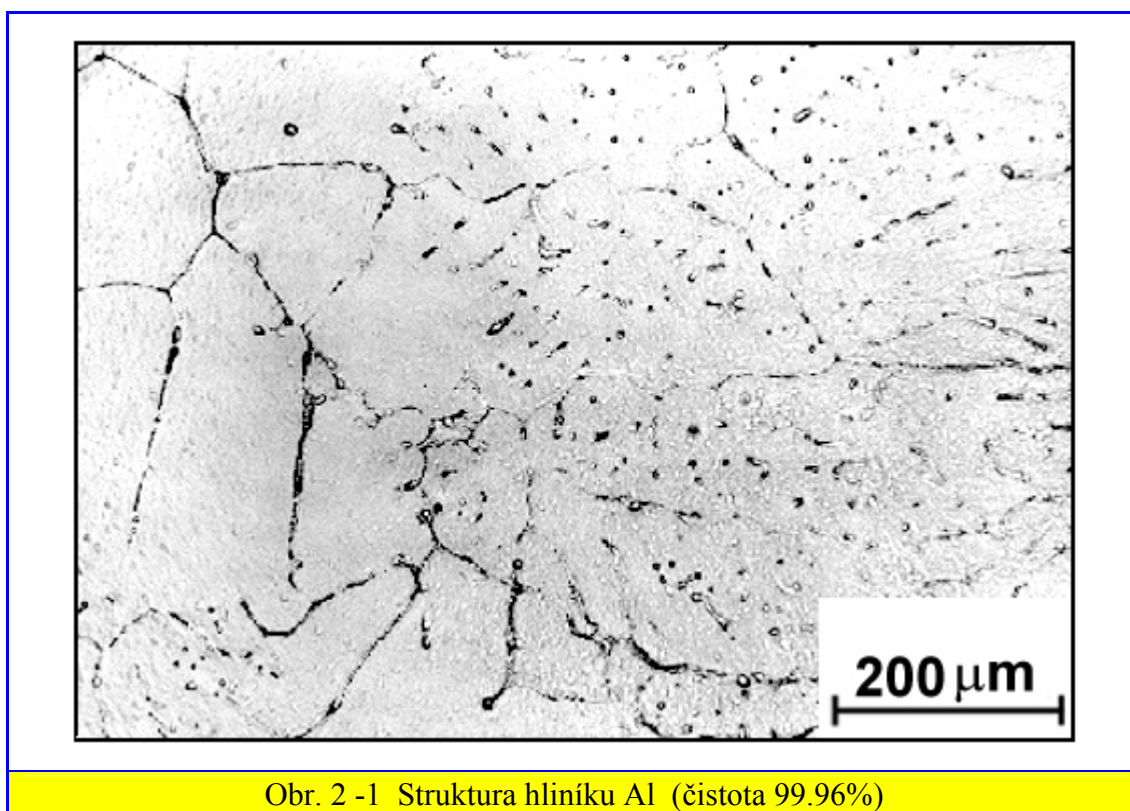
2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

2.1 Charakteristika hliníku a jeho slitin

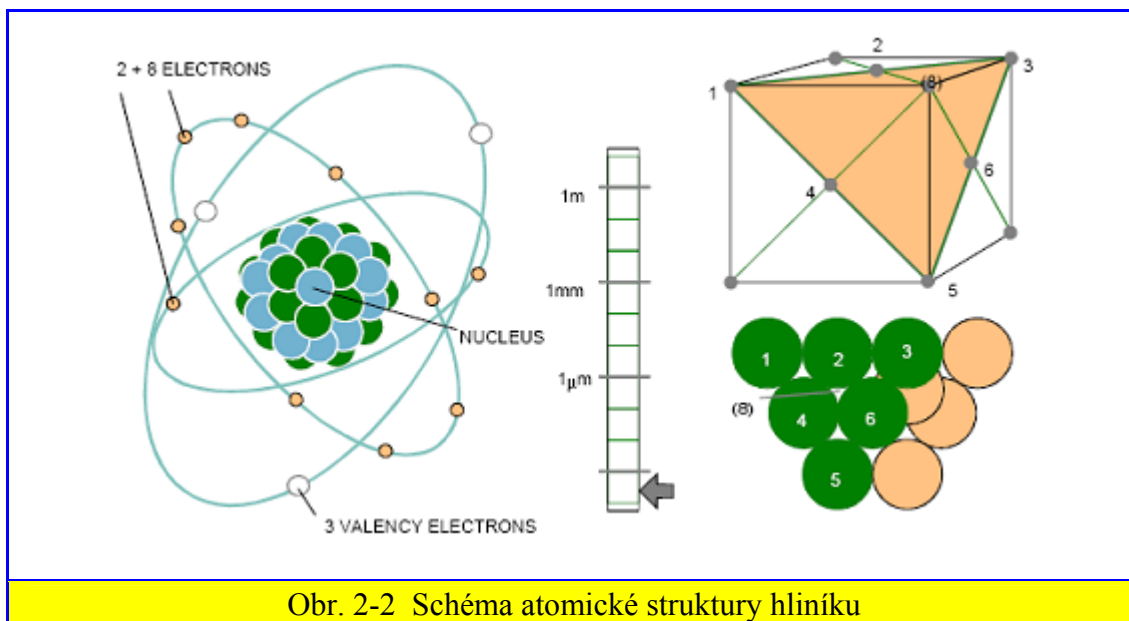
2.1.1. Hliník

Kov bílé barvy, vysoké elektrické a tepelné vodivosti s poměrně vysokou hodnotou měrného tepla tání. Hliník a jeho slitiny se vyznačují vysokým poměrem meze pevnosti v tahu a hustoty. Pevnostní charakteristiky je možné intenzivním tvářením zvýšit. Hliník má kubickou plošně centrovanou mřížku, teplotu tavení 660°C , hustotu 2699 kg.m⁻³ při čistotě 99,99 %. Pro ilustraci je na obr. 2-1 struktura čistého hliníku.

Významnou vlastností hliníku je jeho poměrná stálost na vzduchu. Ke zjemnění zrna se přidávají malá množství prvků, například Ti, Zr, Ta.



Hliník a jeho slitiny krystalizují v kubicky plošně středěné struktuře (fcc) a proto mají výborné tvarovací vlastnosti, které se dají dále ovlivňovat stupněm a typem legování. Slitiny hliníku se používají pro slévářenskou výrobu i pro tváření.



Při dosažení teploty 660°C u čistého hliníku dochází ke krystalizaci v krychlové, prostorově středěné mřížce s těsným uspořádáním atomů. Každá elementární buňka je tvořena 14 atomy, z nichž 8 je umístěno v rozích krychle a 6 ve středech ploch. Koordinační číslo je 12, to znamená, že každý atom je obklopen 12 nejbližším sousedními atomy.

S rostoucí teplotou roste i mřížkový parametr. Při teplotách pod 660°C, kdy je čistý hliník v pevném stavu a jednotlivé atomy jsou vázány na určitou polohu, je vazba mezi nimi, jako u všech kovů, nazývána vazbou kovovou. Při nerušené krystalizaci se jako krystalizační zárodky vytvářejí nejčastěji elementární prostorové buňky, ke kterým se připojují další atomy, vytvářející prostorovou mřížku.

V zemské kůře je hliník nejvíce obsaženým kovem (8 hmotnostních procent ze všech prvků). Získává se z nerostů na bázi hydroxidu hlinitého, který je znám pod názvem bauxit.

Čistý hliník se v průmyslu moc neužívá a to pro poměrně malou pevnost, která se ještě zmenšuje s rostoucí čistotou. Pokud je čistý hliník použit, jsou rozhodujícím faktorem jeho další vlastnosti, zejména velká elektrická vodivost, malá hmotnost a odrazivost světla.

Běžným průmyslovým materiálem jsou slitiny hliníku, které pro svoji velmi nízkou měrnou hmotnost ($2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) jsou velmi používaným materiálem pro konstrukci dopravních prostředků. Ačkoliv na druhé straně k jejich nízké měrné hmotnosti, výrobky ze slitin hliníku musí mít také požadované mechanické vlastnosti, převážně pevnost a tvrdost. V tabulce č.1 je uveden přehled základních vlastností čistého hliníku.

Tabulka 2.1 Přehled vlastností čistého hliníku

Vlastnost	Hodnota
Atomové číslo	13
Atomová hmotnost (g/mol)	26.98
Počet valenčních elektronů	3
Krystalová struktura	Prostorová středná
Bod tání ($^{\circ}\text{C}$)	660.2
Bod varu ($^{\circ}\text{C}$)	2480
Střední měrné teplo (0-100 $^{\circ}\text{C}$) (cal/g. $^{\circ}\text{C}$)	0.219
Tepelná vodivost (0-100 $^{\circ}\text{C}$) (cal/cms. $^{\circ}\text{C}$)	0.57
Součinitel tepelné roztažnosti (0-100 $^{\circ}\text{C}$) ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	23.5
Elektrický odpor při 20 $^{\circ}\text{C}$ ($\mu\Omega\text{cm}$)	2.69
Hustota (g/cm ³)	2.6898
Modul pružnosti (GPa)	68.3
Poissonovo číslo	0.34

2.1.2. Slitiny hliníku

Slitiny hliníku se obecně dělí na dvě skupiny :

a) slévárenské slitiny hliníku – to jsou především slitiny Al-Si (siluminy), jedná se o nejrozšířenější slévárenské slitiny. Al-Si slitiny můžeme rozdělit na :

- podeutektické 4,5 - 10 % Si
- eutektické 10 - 13 % Si
- nadeutektické nad 13 % Si

Dále se jedná o slévárenské slitiny typu Al-Si-Mg, Al-Si-Cu, Al-Si-Cu-Ni, Al-Cu, Al-Mg. V tabulce 2 je uveden základní přehled slévárenských slitin hliníku.

Tabulka 2.2 Slévárenské slitiny hliníku dle normy EN 1706

Slévárenské slitiny hliníku	
Číslo skupiny	Typ legury
1xxx	čistý hliník, minimálně 99% Al
2xxx	měď
3xxx	křemík, s přidavkem mědi a (nebo) hořčíku
4xxx	křemík
5xxx	hořčík
7xxx	zinek
8xxx	cín
9xxx	ostatní legury

b.) slitiny určené k tváření - se dělí podle toho, zda je možné jejich vlastnosti dále zvyšovat precipitačním vytvrzováním:

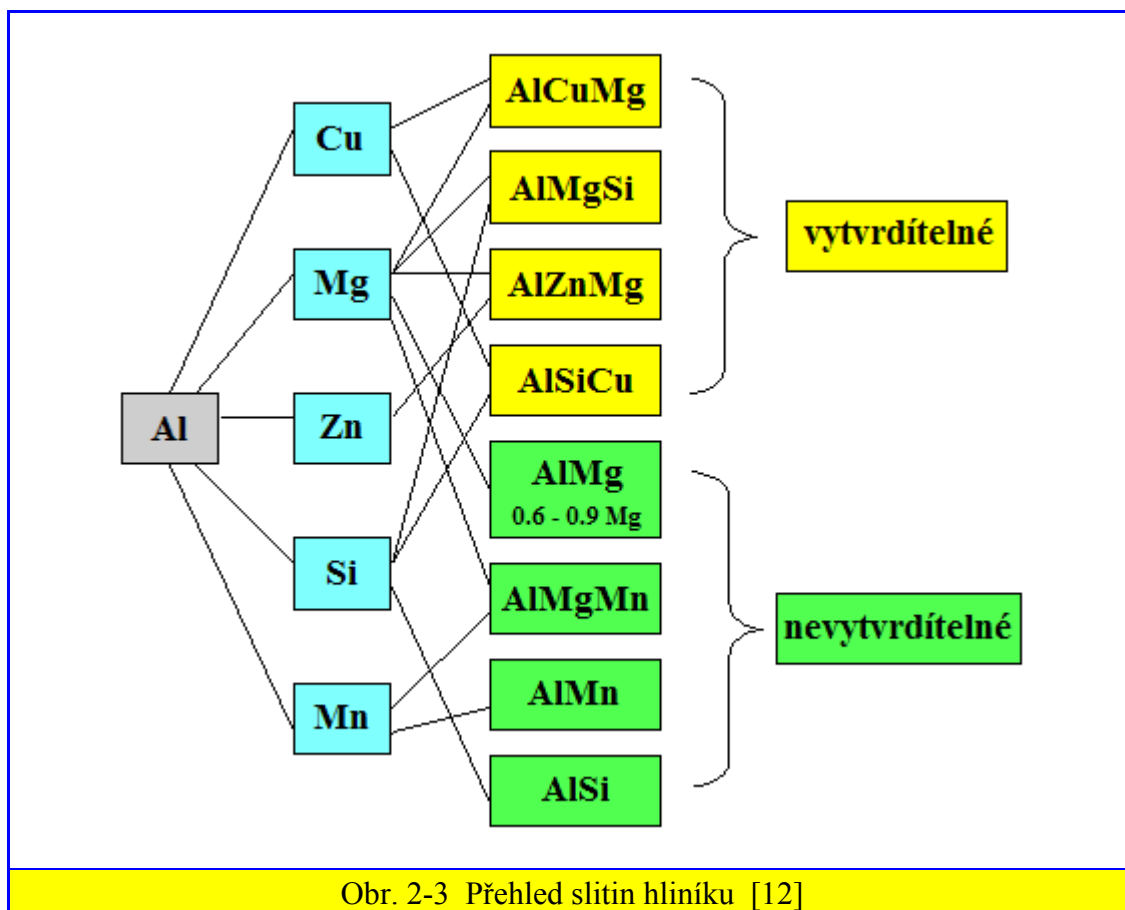
- slitiny vytvrditelné (slitiny typu Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu)
- slitiny nevytvrditelné (zejména slitiny Al-Mg, Al-Mn)

V tabulce 3 jsou uvedeny základní skupiny slitin hliníku pro tváření.

Tabulka 2.3 Tvářené slitiny hliníku dle normy EN 1706

Tvářené slitiny hliníku	
Číslo skupiny	Typ legury
1xxx	čistý hliník, minimálně 99% Al
2xxx	měď
3xxx	mangan
4xxx	křemík
5xxx	hořčík
6xxx	hořčík a křemík
7xxx	zinek
8xxx	jiné legury

Nejčastěji se maximální součet obsahu legujících prvků pohybuje okolo 11% ve slitinách určených ke tváření a kolem 24% pro slévárenské slitiny [12]. Celkem je známo kolem 300 používaných slitin, které můžeme podle typu a obsahu legur rozdělit do několika skupin. Nejpoužívanějšími legurami jsou prvky Cu, Mg, Zn, Si, Mn. Slitiny můžeme rozdělit také podle jejich možnosti precipitačního vytvrzení na slitiny vytvrditelné a nevytvrditelné. Jednoduché rozdělení je zobrazeno na obrázku č. 4.



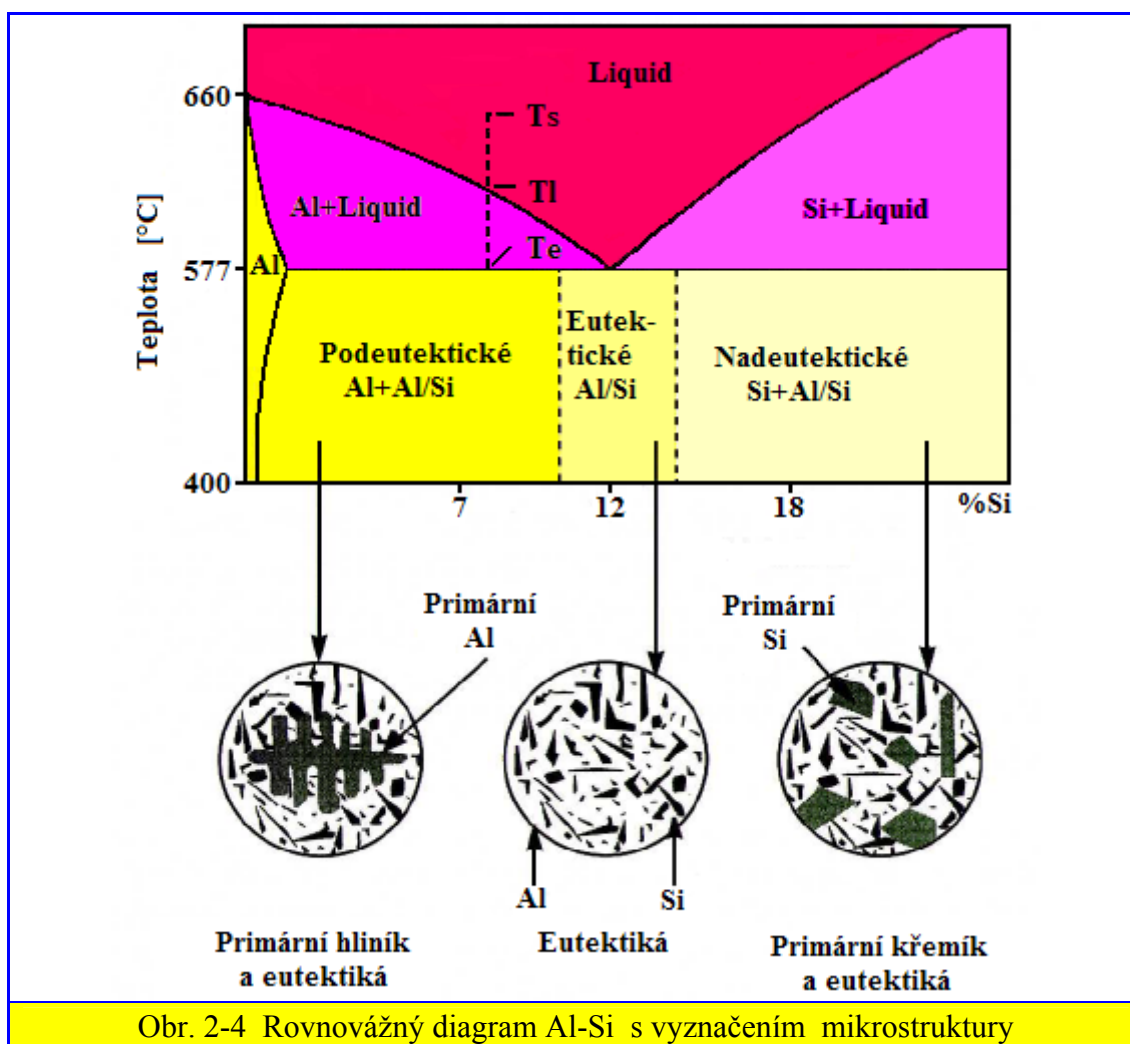
Slitiny hliníku určené pro slévání musí zaručovat nejen dobré mechanické vlastnosti, korozní odolnost, nízkou měrnou hmotnost, musí také zajistit výborné slévárenské vlastnosti jako například tekutost, zabránit vzniku trhlin a vzniku staženin. Nejvíce používanými jsou slitiny na bázi AlSi, AlMg, AlCu, AlMn a AlZn.

2.1.2.1 Slitina na bázi Al – Si

Slitiny Al-Si, které jsou známe pod obchodním názvem „siluminy“ se dělí:

- podeutektické 4,5 - 10 % Si;
- eutektické 10 - 13 % Si;
- nadeutektické nad 13 % Si.

Na obr. 2-4 je uveden rovnovážný binární diagram soustavy Al – Si.



Slitiny na bázi Al – Si patří mezi nejpoužívanější slévárenské slitiny hliníku. Krystalizují podle rovnovážného diagramu označeném Roozenboomem jako typ V (tuhnutí kovů s částečnou rozpustností v tuhém stavu).

Slitiny Al-Si neobsahují měď, proto se používají tam, kde je potřeba výborná slévateľnost. Slitinu hliníku s křemíkem lze použít k odlévání již při obsahu kolem 2% křemíku, avšak ve skutečnosti obvyklý obsah Si je mezi 5 – 13%. Slitiny hliníku obsahující cca kolem 10 % Si tuhnou téměř při konstantní teplotě.

Slitiny se používají pro všechny druhy technologie lití – lití do pískových forem, do kovových forem, lité pod tlakem i pro přesné lití. Přidáním hořčíku lze slitinu tepelně zpracovávat a tím zlepšit její mechanické vlastnosti. Další zlepšení mechanických a slévárenských vlastností lze docílit očkovaním titanem a bórem,

kterým dochází ke zjemnění struktury a modifikací slitin sodíkem či stronciem, jenž způsobí rozdílný tvar vyloučeného křemíku.

2.1.2.2 Slitina na bázi Al – Mg

Základním požadavkem na odlitky vyrobené ze slitin na bázi Al – Mg je vysoká odolnost proti korozi, převážně za působení mořské vody nebo pouze přímořské atmosféry. Slitiny mají výborné mechanické vlastnosti a můžeme je tak řadit mezi nejkvalitnější slévárenské hliníkové slitiny. Nevýhodou je však vysoký sklon k tvorbě staženin, nízká zabíhavost a vysoká smršťivost. Ve slitině, kde vedle hořčíku je rovněž přítomný křemík se slévárenské vlastnosti zlepšují. Slitiny Al – Mg mají dobrou obrobiteľnost a jsou vhodné k anodizaci, kdy se vzhled odlitku stává atraktivním. Hořčík obsažený ve slitině snadno oxiduje. Oxidace se částečně potlačuje přidáním 0,02% Berylia. Slitiny Al – Mg se nedají tepelně zpracovat a používají se v litém stavu. Horší slévárenské vlastnosti a oxidace hořčíku značně zvyšuje požadavek na kvalitu přípravy slitiny a přísné dodržení technologických podmínek ve slévárnách, což má za následek vyšší cenu odlitku.

2.1.2.3 Slitiny na bázi Al – Zn

Binární slitiny Al – Zn se vyznačují horšími slévárenskými vlastnostmi, převážně vysokou smršťivostí. Proto se slitiny dále legují prvky Si, Cu, Mg. Celkový obsah legur nesmí být vyšší jak 8 %. U slitin s vyšší procentem dochází k výraznému snížení odolnosti vůči interkrystalické korozi. Slitiny Al-Zn-Mg mají schopnost přirozeného stárnutí, dokončení plné pevnosti za pokojové teploty 20-30 dnů po odlití odlitků.

2.1.2.4 Slitiny Al – Sn

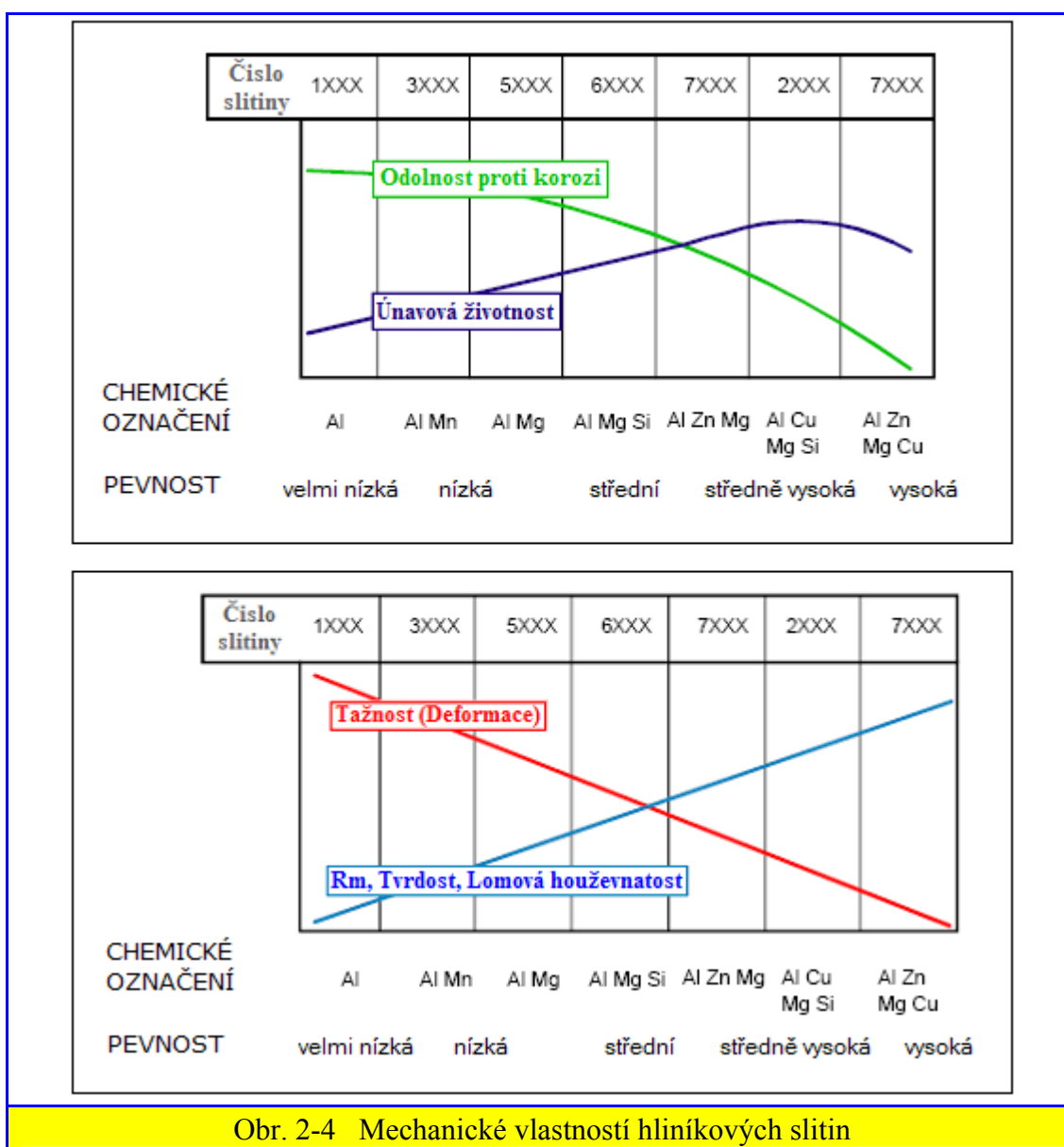
Binární soustava Al – Sn spolu netvoří tuhý roztok. Eutektikum při obsahu 0,5 % cínu krystalizuje při teplotě 228,3°C a je uloženo v mezidendrických oblastech primárního hliníku. Ve slévárenství se používají nadeutektické slitiny Al – Sn.

Ve struktuře se objevují primární zrna cínu. Hliníkové slitiny s obsahem kolem 6% cínu a malým obsahem mědi a niklu jsou používány pro odlévání ložisek. Mají výborné třecí vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou ale silně ovlivněny odlévací metodou. Nejlepší výsledky jsou dosaženy pouze rychlým chlazením.

2.1.2.5 Slitiny na bázi Al – Cu

Hliníkové slitiny Al – Cu je možno tepelně zpracovávat. Tvoří hlavní skupinu vytvrditelných vysoko pevnostních slitin. Vedle vysoké pevnosti se vyznačují také dobrou tažností. Nevýhodou těchto slitin je relativně obtížná slévateľnost, špatná svařitelnost a malá odolnost vůči korozi. Slitiny mají široké uplatnění v leteckém a automobilovém průmyslu. Lze se s nimi setkat při výrobě pístů, vzduchem chlazených válců hlav pro motocykly a při výrobě dieselových motorů.

2.1.2.6 Mechanické hodnoty slitin hliníku

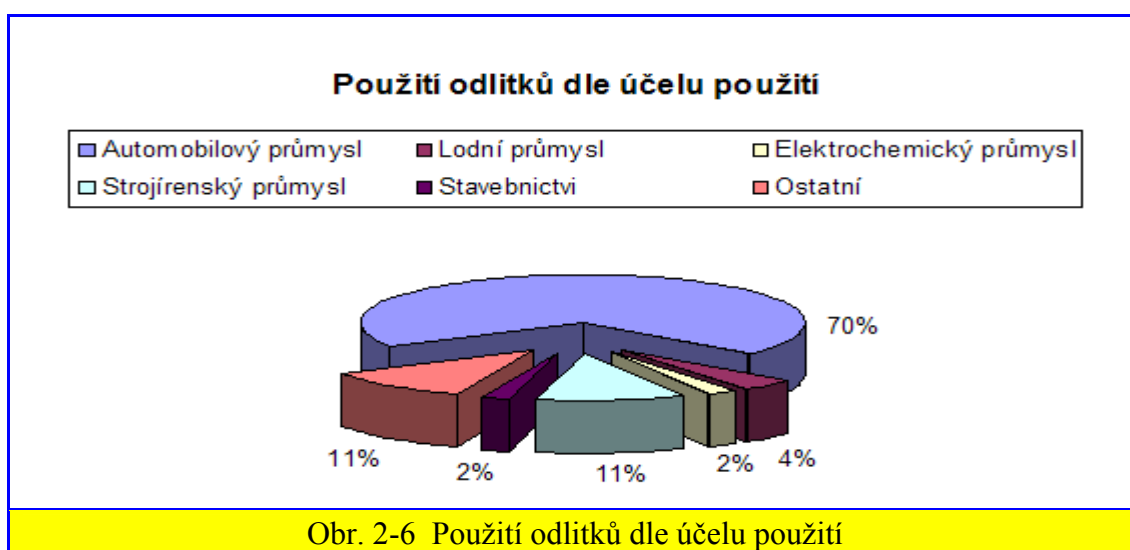
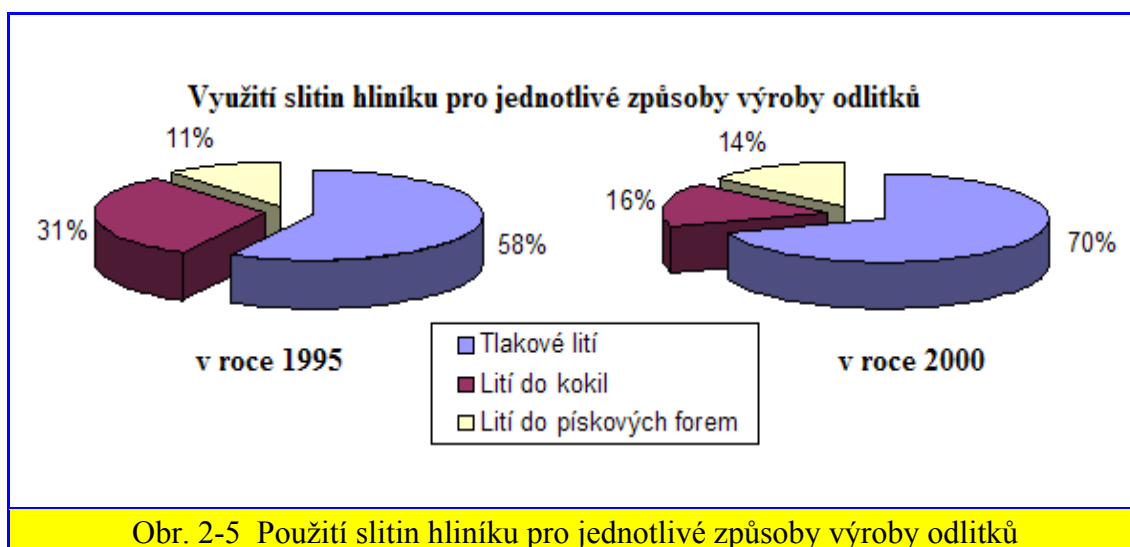


Obr. 2-4 Mechanické vlastností hliníkových slitin

2.1.2.7 Využití slitin hliníku v praxi:

- strojírenství (odlitky, konstrukční součástky, různé profily, atd.)
- automobilový průmysl (části motorů, profily pro výplně dveří, pouzdra tlumičů, atd.),
- letecký průmysl (používají se slitiny na bázi Al-Li)
- potravinářský průmysl (obalová technika - alobal)
- elektrotechnika (kabely, dráty)
- stavebnictví (fasádní profily, profily pro výrobu dveří a oken, atd.)

Na obr. 2-5 a 2-6 je schéma využití slitin hliníku při různých způsobech odlévání a jejich využití v různých odvětvích průmyslu. V tabulce 4 je uveden přehled oblastí využití slitin hliníku ve vybraných státech světa.



Tabulka 2.4 Přehled využití slitin hliníku [%] v průmyslových odvětvích ve vyspělých státech

	JAPONSKO	USA	NĚMECKO	ITÁLIE	FRANCIE	ANGLIE
DOPRAVA	83	60	74	65	83	62
VŠEOBECNÉ STROJÍRENSTVÍ	8	14	13	7	5	5
ELEKTROTECHNIKA	5	9	5	8	6	15
STAVEBNICTVÍ	3	4	4	12	1	5
DOMÁCÍ A KANCELÁŘSKÝ VYBAVENÍ	1	13	4	8	5	13

2.1.3 Způsoby lití

2.1.3.1 Lití do kovových forem

Kovové formy jsou trvalé. Vydrží několik set až několik desítek tisíc odlití podle charakteru slitiny a konstrukce odlitku. Slitiny Al se už zcela běžně a bez potíží odlévají gravitačně do kovových forem. Odlitek v kovové formě vykryštalizuje jemněji než v pískové formě, protože chladne rychle (není-li příliš nahřátá forma).

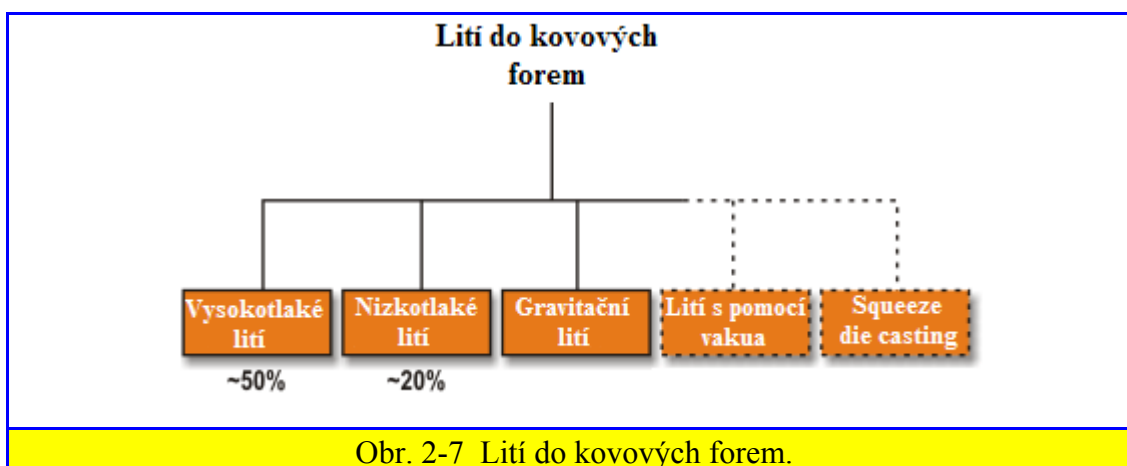
Jemnost krystalizace lze ještě zvyšovat buď rušením krystalizace vibrací, nebo rušením krystalizace v proudu před vstupem kovu do formy.

Rozměrová přesnost a povrchová hladkost odlitku je lepší než u odlitků litých do písku, a proto lze zmenšit, popřípadě vypustit některé přídavky na obrábění. Lití do kovových forem patří tedy k metodám přesného lití.

Do kokil lze odlévat odlitky, které vyhovují těmto podmínkám:

- 1.) stěna musí mít takovou tloušťku, aby při vhodné výchozí teplotě kokily ještě odlitek zaběhl,
- 2.) odlitky se mají snadno vyjímat z forem (příměřené úkosy), náhlé přechody v tloušťkách stěn, vystupující části, které by bránily smršťování odlitku, ostré vnější hrany a rohy, jakož i ostré vnitřní hrany a kouty jsou nepřipustné.

Na obr. 2-7 jsou uvedeny základní způsoby lití do kovových forem.



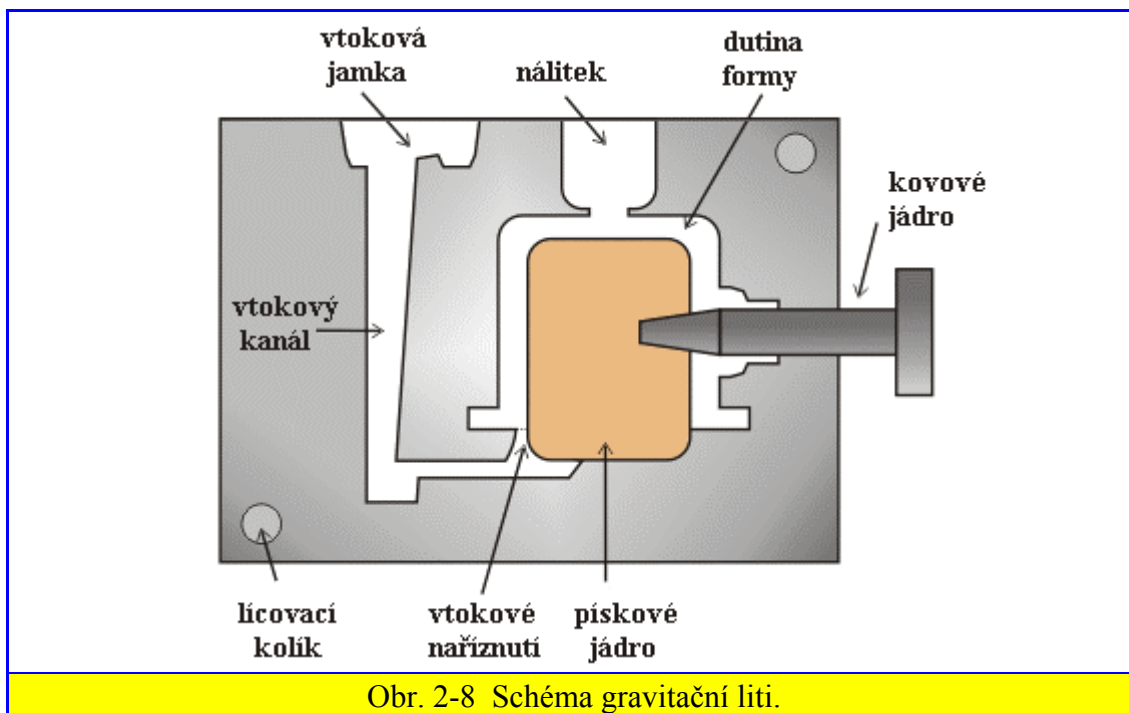
2.1.3.2 Gravitační lití

Při výrobě některých součástí (pístů, hlav spalovacích motorů) se uplatňuje gravitační lití do kovových forem. V porovnání s litím do pískových forem jsou kovové dražší, avšak odlitky z kovových forem se vyznačují výbornou vnitřní kompaktností. Kovová forma má však malou prodyšnost, ale velkou tepelnou akumulaci schopnost a značnou pevnost, která znemožňuje volné smršťování odlitku.

Žárovzdornost kovových forem umožňuje odlévání slitin s vyšší teplotou tání (cca 700 °C), výjimečně se odlévá i litina (brzdové válečky) a slitiny jiných kovů. Tvar odlitku s ohledem na popsané odlišnosti se volí velmi jednoduchý.

Slévárenská forma se dělá zpravidla dělená. Vtoková soustavu tvoří kanál s nálevkou nebo vtokovou jamkou. Ustavení obou polovin forma je pomocí vodících kolíků.

Na obr. 2-8 je uvedena kokila pro gravitační liti.



Výhoda:

- *dobré mechanické hodnoty odlitku*
- *kvalitnějším povrchem než u odlitků litých do pískových forem*
- *dobrá povrchová hladkost odlitku*
- *odlitky se vyznačují velkou pevností a hutností materiálu*

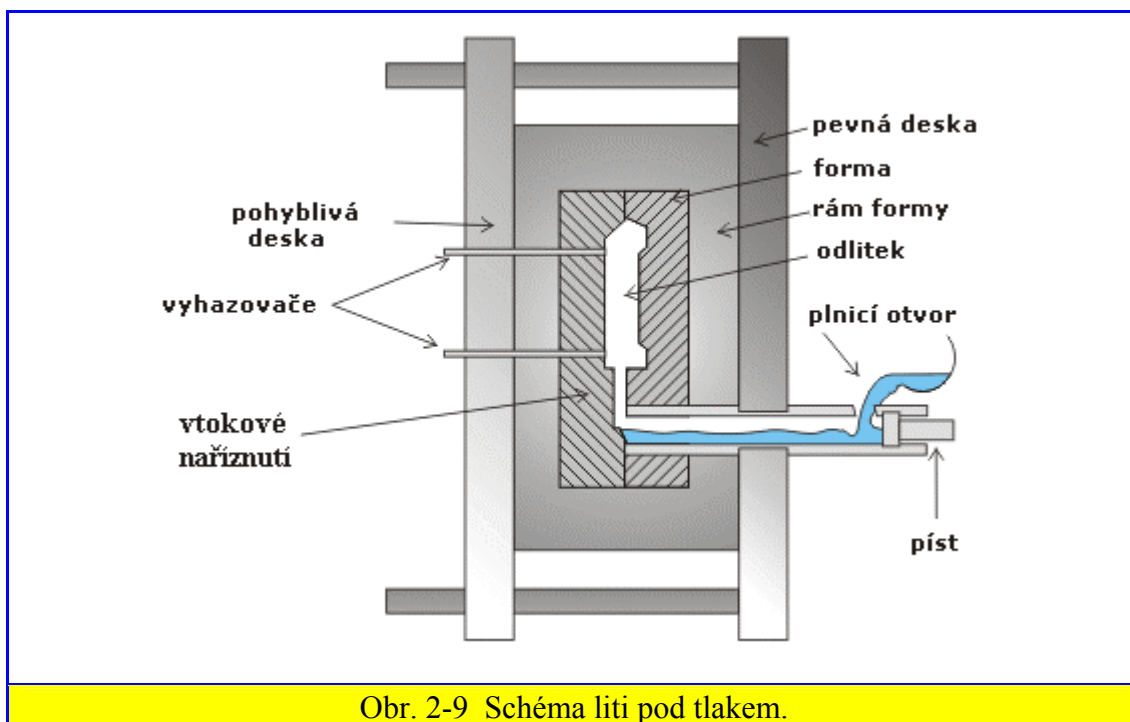
Nevýhoda:

- *omezena složitost odlitku*
- *omezena hmotnost odlitku (<15kg)*

2.1.3.3 Lití pod tlakem

Roztavený kov je vstřikován do trvalé kovové formy velkou rychlostí (10 až 100 m.s⁻¹ i více), které kov dosahuje značným zúžením vtoku v místě, které se nazývá vtokové nařiznutí, tím že na něj působí vysoký tlak. Tlak se na slitinu přenáší pístem nebo stlačeným vzduchem.

Slitina téměř okamžitě ve formě ztuhne, forma se rozevře a vyhazovače uvolní odlitek. Slitina musí být v tekutém stavu u stroje, a proto jsou u tlakových strojů udržovací pece. Tlakově lze odlévat odlitky od kusové hmoty 1g do 25kg hliníku a více.



Obr. 2-9 Schéma liti pod tlakem.

Výhoda:

- vysoká kvalita odlitku
- rychlá výroba i z jediné formy, do které se často umísťuje sada odlitků
- možnost výroby součástí složitých tvarů a tenkostěnných odlitků
- dobrá rozměrová přesnost a hladší povrch odlitků než u jiného způsobu liti

Nevýhoda:

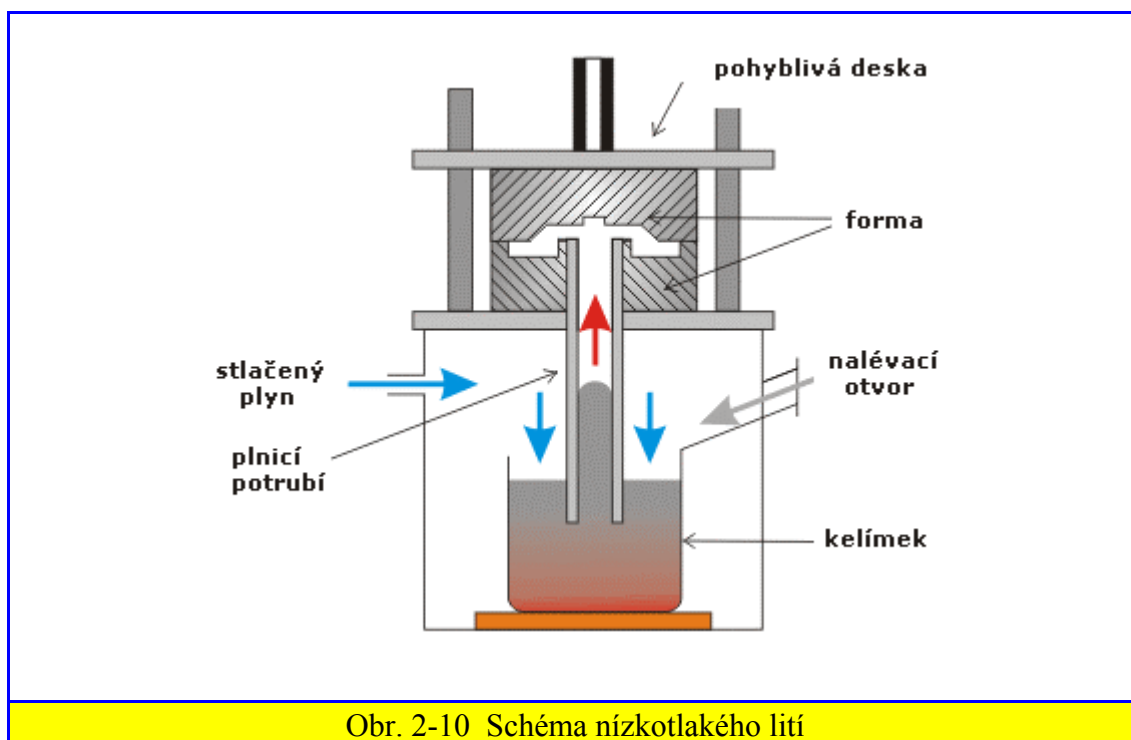
- relativně nízká produktivita (vysoké náklady na zhotovení lící formy)
- velikost odlitku omezena velikostí lícího stroje
- vysoké investiční náklady na lící stroje a další zařízení
- možnost použití jen u neželezných kovů a u menšího počtu neželezných slitin

2.1.3.4 Nízkotlaké lití

Nízkotlaké lití bývá neprávem srovnáváno s litím vysokotlakým. Co do produktivity práce, přesnosti a povrchu odlitku se mu zdaleka nevyrovná. Získají se jím však odlitky s větší hustotou stěny a bez vad, které jsou charakteristické pro odlitky odlévané tlakovým litím.

Nízkotlaké lití lze srovnávat s litím do gravitačních kovových forem, proti kterému má řadu výhod. Z hlediska technologie je to klidné plnění formy kovem, které je u hliníkových odlitků nezbytné. Jeho největší předností je vysoké využití tekutého kovu, které v průměru dosahuje 95%.

V poslední době se využívá nízkotlakého lití při odlévání přesných odlitků a odlitků z ostatních neželezných kovů. Schéma principu nízkotlakého lití je na obr. 2-10.



Obr. 2-10 Schéma nízkotlakého lití

Výhoda:

- vysoká kvalita odlitku
- rychlá výroba i z jediné formy, do které se často umísťuje sada odlitků
- možnost odlití složených tvarů odlitků
- dobrá rozměrová přesnost a hladší povrch odlitků

Nevýhoda:

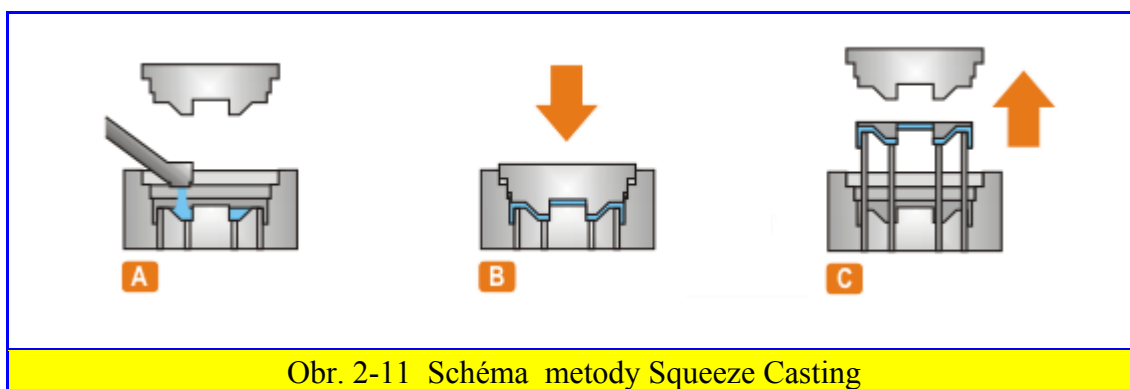
- relativně nízká produktivita (vysoké náklady na zhotovení lící formy)
- velikost odlitku omezena velikostí lícího stroje
- vysoké investiční náklady na lící stroje a další zařízení

2.1.3.5 Tlakové lití s pomocí vakua

Při této technologii je v prostoru dutiny formy snižován tlak pomocí vakua, což vede ke snížení množství pohlčeného vzduchu. Tento postup se nabízí především pro velmi tenkostěnných odlitků a k získání homogenosti a hutnosti odlitků často za pomoci nižších lisovacích parametrů. Důvody pro použití této technologie jsou např. v nedolití, uzavření plynů, nekvalitní povrch a poréznost odlitku.

2.1.3.6 Squeeze Casting nebo Squeeze Forming

Squeeze Casting patří k nestandardní metodě, která pomáhá řešit vnitřní jakost odlitku s rozdílnou tloušťkou stěn a s tepelnými uzly, ve kterých je třeba potlačit vznik staženin a mikrostaženin. Principem této metody je v určeném časovém okamžiku vtlačení speciálního písku do pomocného nálitku umístěného nad materiálovým uzlem ještě před úplným ztuhnutím kovu ve formě. Pro uplatnění této metody je třeba konstrukčně upravené formy a dalšího přídavného zařízení. Na obr. 2-10 je principiální schéma metody squeeze casting.



Obr. 2-11 Schéma metody Squeeze Casting

Slitiny hliníku mají velké uplatnění při výrobě členitých odlitků pro letecký a automobilový průmysl. Výroba těchto odlitků je neustále rozšiřována a též vznikají nové modifikované slévárenské způsoby.

2.2 Tuhnutí a chladnutí odlitků

2.2.1 Průvodní jevy při tuhnutí odlitků

Při tuhnutí probíhají uvnitř odlitku fyzikální a chemické pochody, jejichž výsledkem může být:

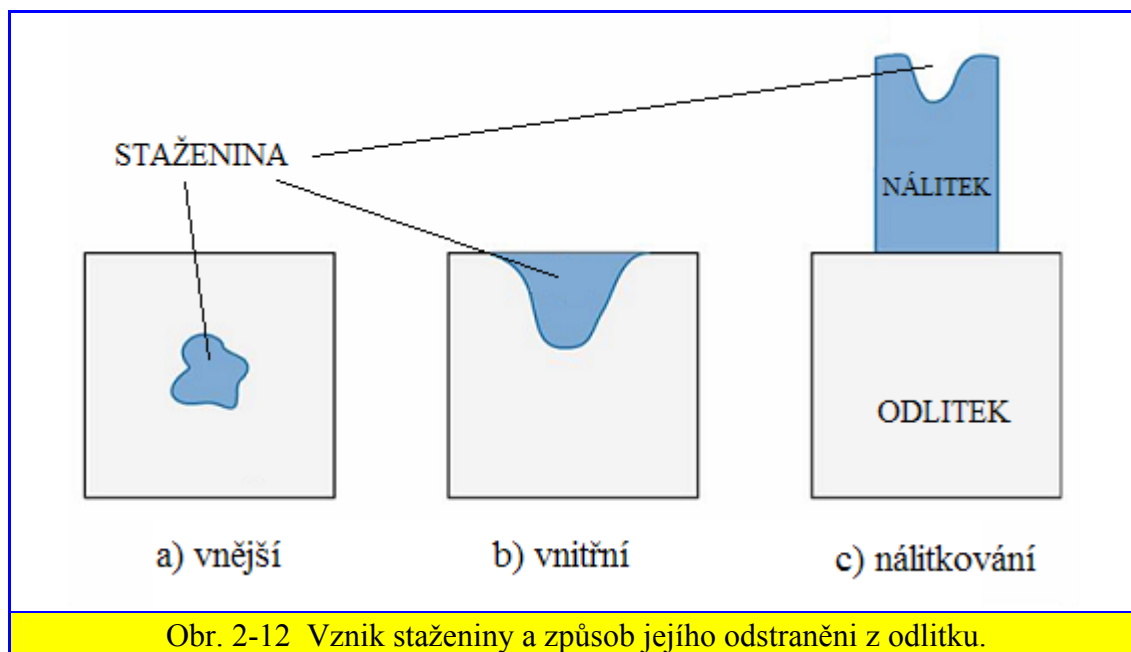
- 1.) Tvoření staženin- tento pochod se označuje jako stahování
- 2.) Vylučování plynů a tvoření endogenních (či vrozených) bublin
- 3.) Poruchy dvoufázového pásma a tvoření vycezenin. Pochod se označuje jako vycezování

2.2.1.1 Tvoření staženin v odlitcích

Průvodním jevem objemového smršťování odlitku je vznik staženin, to je vnitřních nebo vnějších dutin v odlitku. Staženiny vznikají v průběhu tuhnutí slitiny v intervalu mezi likvidám a solidem nebo za eutektického tuhnutí slitiny

Tvoření staženin v odlitcích je výsledek objemových změn taveniny, objemových změn při změně skupenství a objemových i rozměrových změn tuhého skupenství, které probíhají současně v údobí, kdy odlitek tuhne. Většinou jde o zmenšování objemu s klesající teplotou, tj. o smršťování, avšak u některých slitin se vyskytuje i dočasné zvětšování objemu – roztahování. Z uvedeného důvodu budeme tyto změny obecně označovat souhrnným názvem dilatace a budeme je rozlišovat znaménky + (smršťování) a – (roztahování).

Při tuhnutí odlitku nebo jeho části, postupujícím z vnějšku, se postupně izotermické plochy ztuhlé fáze uzavírají směrem do tepelné osy, popř. tepelného středu odlitku. Dutiny vznikají v místech, kde tuhnou poslední podíly taveniny. Tlakovým působením smršťující kůry nastává zmenšování vnitřního uzavřeného prostoru, čímž se konečná velikost staženiny zmenší. Matematické určení objemových změn je obtížné, neboť tahové napětí, které by mělo ve vnější vrstvě vzniknout, je eliminováno plasticitou těchto vrstev, danou vysokou teplotou ztuhlého kovu. Může však dojít naopak i k protažení kůry, což působí na zvětšení objemu staženiny.



Kinetiku vzniku vnější staženiny lze vysvětlovat na základě nepřetržitě krystalizujících vrstev, které se během tuhnutí připojují na vrstvy dříve ztuhlé. Jakmile celý objem kovu ztuhne a odvod tepla formou zůstane zachován, pak v důsledku pokračujícího vnějšího ochlazování se odlitek v celém objemu smršťuje až do normální teploty.

Podobně je tomu v případě, kdy vzniká vnitřní staženina. Předpokládejme, že v tomto případě je smrštění v tekutém stavu kompenzováno vtokovou soustavou, takže probíhá bez poklesu hladiny tuhnutí vrstev na stěnách formy. Proto poslední ztuhlá vrstva taveniny ohraničuje vnitřní dutinu, tzv. vnitřní staženinu.

2.2.1.2 Klasifikace dilatací a základní pojmy

Smršťování v obecném pojetí znamená vždy zmenšování objemu při chladnutí odlitku a vyjadřuje se zpravidla jako úbytek objemu v určitém intervalu teplot.

Vždy jde tedy o smršťování objemové, které probíhá:

- 1.) *V tekutém skupenství*
- 2.) *Při změně skupenství (při krystalizaci)*
- 3.) *V tuhém skupenství*

- 1) Smrštění taveniny se vyjadřuje jako relativní úbytek objemu v % na °C v pozorovaném rozmezí teplot ($T_1 - T_2$).

Smršťování taveniny se projevuje poklesem její hladiny.

$$\varepsilon_{VL} = \alpha_{VL} \cdot (T_1 - T_L) \cdot 100\% \quad [\%], \quad (2.2.1)$$

kde značí: ε_{VL} - objemové smrštění kovu v tekutém stavu [%]

α_{VL} - součinitel objemového smrštění v tekutém stavu [K^{-1}]

T_1 - teplotu liti [°C]

T_L - teplotu likvidu [°C].

- 2) Smršťování při změně skupenství je důsledek přeměny tekutého skupenství v tuhé, která probíhá při jediné teplotě u čistých kovů a u eutektických slitin, v rozmezí teplot u ostatních slitin (při vyšší teplotě je likvidus blíže povrchu, při nižší teplotě je solidus v tepelné ose odlitku). Projevuje se poklesem hladiny taveniny, avšak vyjadřuje se opět objemově, tj. v % na °C.

S poklesem teploty přibývá tuhé fáze a zároveň ubývá fáze tekuté. Objemové smrštění při krystalizaci můžeme vyjádřit vztahem:

$$\varepsilon_{VK} = \alpha_{VK} \cdot (T_L - T_S) \cdot 100\% \quad [\%], \quad (2.2.2)$$

kde značí: ε_{VK} - smrštění kovu při krystalizaci [%]

α_{VK} - součinitel objemového smrštění v intervalu teplot [K^{-1}]

T_L - teplotu likvidu [°C]

T_S - teplotu solidu [°C]

- 3) Smršťování tuhé fáze probíhá ve dvou etapách:

- při tuhnutí přibývá objemu tuhé fáze na úkor fáze tekuté, avšak tuhá fáze se zároveň smršťuje, tj. zmenšují se i vnější rozměry tuhé fáze,
- po skončeném tuhnutí se plynule zmenšuje objem tuhé fáze: přestože smršťování tuhé fáze je rovněž objemové, vyjadřuje se změnou vnějších rozměrů ztuhlého odlitku s klesající teplotou v mm/°C nebo v % na °C.

Proto se označuje jako smršťování lineární.

Je-li vyjádřeno bez udání určitého rozmezí teplot, rozumí se celé rozmezí teplot od solidu do pokojové teploty. Pak jde o běžné lineární smrštění, které se uvádí jako míra smrštění při stanovení rozměrů modelového zařízení. Totéž platí i o roztahování, ovšem v opačném smyslu.

Objemové smrštění v odlitku v tuhém stavu můžeme vyjádřit vztahem:

$$\varepsilon_{VS} = \alpha_{VS} \cdot (T_S - T_O) = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \cdot 100\% \quad [\%], \quad (2.2.3)$$

kde značí: α_{VS} - součinitele objemového smrštění tuhém stavu [K^{-1}]

T_O - teplotu okolí [$^{\circ}C$]

T_S - teplotu solidu [$^{\circ}C$]

V_1 - objem odlitku za teploty T_1 [m^3]

V_0 - objem odlitku za teploty T_0 [m^3]

Změna objemu kovu a slitin se změnou teploty je dána:

$$V_1 = V_0 \cdot [1 - \alpha_{VS} \cdot (T_S - T_O)] \quad [m^3] \quad (2.2.4)$$

kde značí: α_{VS} - součinitele objemového smrštění tuhém stavu [K^{-1}]

T_0 - teplotu okolí [$^{\circ}C$]

T_S - teplotu solidu [$^{\circ}C$]

V_1 - objem odlitku za teploty T_1 [m^3]

V_0 - objem odlitku za teploty T_0 [m^3].

Hodnota tepelného smrštění kovu je fyzikální vlastnosti daného kovu, za předpokladu jeho homogenity.

2.2.1.3 Volné a brzděné dilatace tuhé fáze

Lineární smršťování začíná tehdy, když se vytvořila tuhá souvislá kůra (zpravidla při povrchu odlitku). Jeho počátek tedy nelze ztotožňovat s teplotou likvidy, protože leží přiměřeně níže- lineární smršťování končí dosažením pokojové teploty ve všech částech odlitku.

Absolutní objemové smrštění tuhé fáze v rozmezí teplot se vyjádří vztahem:

$$V_1 = V_0[1 + \alpha_V(T_1 - T_0)] \quad [\text{m}^3], \quad (2.2.5)$$

kde značí: V_1 – objem tuhé fáze odlitku při teplotě T_1 [m^3],

V_0 – objem tuhé fáze odlitku při teplotě T_0 [m^3],

α_V – průměrný součinitel volné objemového smrštění tuhé fáze
v rozmezí teplot ($T_1 - T_0$),

Relativní lineární smrštění tuhé fáze ε_V se vyjádří obdobně:

$$\varepsilon_V = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \cdot 100\% \quad [\%], \quad (2.2.6)$$

pro dané rozmezí teplot, přičemž :

$$\varepsilon_V = \alpha_V(T_1 - T_0) \quad (2.2.7)$$

Absolutní lineární smrštění tuhé fáze se vyjádří změnou rozměrů (délky):

$$l_1 = l_0[1 + \alpha_l(T_1 - T_0)] \quad (2.2.8)$$

kde značí: l_1 – je rovnovážná (nenapjatá) délka určité části při teplotě T_1 [mm],

l_0 – rovnovážná délka téže části při teplotě T_0 [mm]

α_l – koeficient volné tepelné lineární dilatace materiálu odlitku [$^{\circ}\text{K}^{-1}$]

Relativní lineární smrštění ε_L bude:

$$\varepsilon_L = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\% \quad [\%], \quad (2.2.9)$$

přičemž:

$$\varepsilon_L = \alpha_l(T_1 - T_0) \quad (2.2.10)$$

Vztah mezi ε_V a ε_L za předpokladu volného (nebrzděného) smršťování je:

$$\varepsilon_V = 3\varepsilon_L \quad (2.2.11)$$

Volná (nebrzděná) tepelná dilatace slitin probíhá tehdy, nepůsobí-li proti dilatacím odpory. Ve skutečnosti absolutně volné smršťování odlitku neexistuje.

2.2.1.4 Objemové změny při tuhnutí a chladnutí odlitku

Objemové změny při tuhnutí a chladnutí slitiny jsou výsledkem:

1. Fyzikálních vlastností slitiny, tj.
 - a) objemové kontrakce při chladnutí v roztaveném stavu,
 - b) objemové změny při vlastním tuhnutí (s výjimkou vizmutu vždy kontrakce)
 - c) objemové kontrakce při chladnutí v tuhém stavu (s výjimkou teplotních oblastí, ve kterých se uplatňuje u některých kovů alotropická přeměna)
2. Technologických vlivů, a to zejména rychlosti a postupu chladnutí a tuhosti formy

Názorně je působení technologických vlivů vidět na tom, že lineární celkové smrštění hliníkových slitin měřené na volně se smršťující tyči je asi 1,40%, v pískové formě 1,25 až 1,40%, v kokile 0,8 až 1,30% a při tlakovém lití 0,4 až 0,7%.

V tabulce 5 je uveden přehled lineárního smrštění odlitků.

Tabulka 2.5 Lineární míra celkového smrštění u různě litých slitin hliníku

P – do písku, K – do kokily, T – pod tlakem

Slitina	Způsob lití	Míra smrštění [%]
Al-12 Si	P	1 až 1,14
	K	0,5 až 0,8
	T	0,4 až 0,6
Al-6 Si-3 Cu	P	1 – 1,2
	K	0,8 – 1,0
	T	0,5 – 0,8
Al-8 Mg	P	1,1 – 1,6
	K	0,9 – 1,3
	T	0,5 – 0,7

2.3. Krystalizace slévárenských slitin

Ve slévárenství se zabýváme odléváním kovů a slitin do forem. Výsledkem příslušných technologických pochodů a operací je odlitek, který má mít žádané mechanické a fyzikální vlastnosti. K tomu je nutné znát dokonale celý průběh přechodu odlitku z tekuté fáze do tuhé, neboť je to jeden z činitelů ovlivňujících velmi výrazně výsledné vlastnosti odlitku. Volba slitiny, ze které má být odlitek odléván, je dána funkcí odlitku v zařízení, kde bude sloužit. Ve slévárenství se uplatňuje velké množství slitin, které se od sebe liší složením a průběhem tuhnutí a chladnutí. Velmi důležitá je teplota přehřátí nad tavicí teplotou, neboť i ta ovlivňuje výsledné vlastnosti odlitku. Přitom tavicí teplota je dána složením slitin.

Krystalizace je fázovou změnou, při níž přechází tekutá fáze v tuhou. Příčinou tohoto složitého postupného děje je snaha látky dosáhnout při změně vnějších podmínek stavu, který odpovídá nejvyšší možné strukturní stabilitě. Krystalizace a celý průběh chladnutí a tuhnutí kovů a slitin nemůže být rozebírán sám o sobě bez uvažování souvislostí s prostředím, do kterého je kov vléván (jakost formy) a tvarem odlitku (geometrie jeho stěn)

2.3.1 Fázové přeměny při tuhnutí

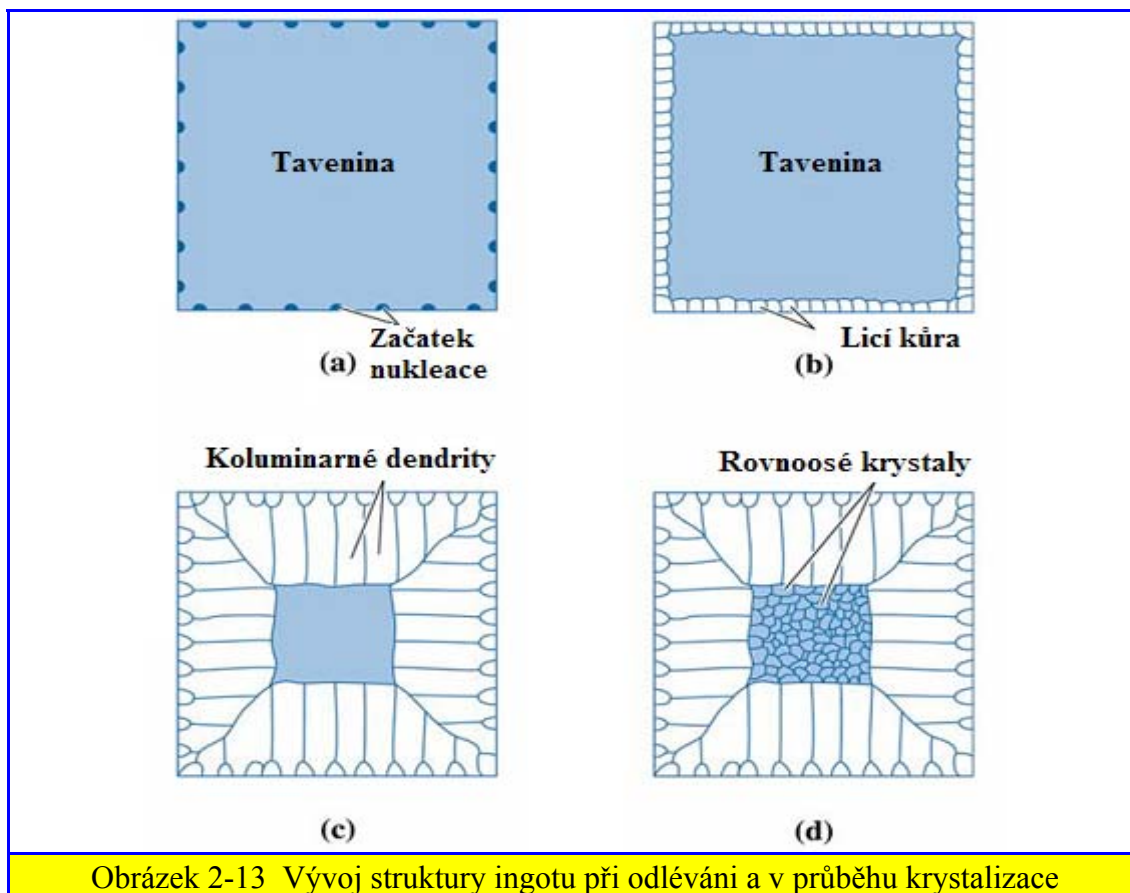
Z hlediska slévárenského mají největší význam fázové přeměny, při nichž nastává změna tekuté fáze ve fázi tuhou. Tato fázová přeměna je doprovázena změnou objemu za současného vybavování skupenského tepla. Význam této přeměny pro výsledné fyzikální vlastnosti ztuhlých částí odlitku je značný, neboť na jakosti výsledné primární struktury závisí konečné mechanické a fyzikálně chemické vlastnosti tuhé fáze.

Ze studia fázových přeměn vyplývá, že existuje teplota, při níž fáze původní a nově vznikající je ve stavu termodynamické rovnováhy. Podmínkou rovnováhy je rovnost volné entalpie obou fází.

2.3.2 Krystalizace kovů a slitin

Většina technických kovů se vyrábí pyrometalurgickou technikou, což znamená, že v určitém stadiu výroby prochází kov kapalným stavem. Rovněž druhotné zpracování kovů slévárenskou technologií předpokládá ohřev kovů do oblasti tavenin. Výsledné vlastnosti takto zpracovávaných kovů závisí na řadě faktorů, z nichž významné místo zaujímají krystalizace, tj. přeměna kapalně fáze ve fázi tuhou.

Krystalizace je fázová přeměna s růstem řízeným přenosem tepla. Mechanismus krystalizace je charakterizován vznikem stabilních zárodků a jejich následným růstem. Základní podmínkou tohoto mechanismu je dostatečně velké přechlazení taveniny.



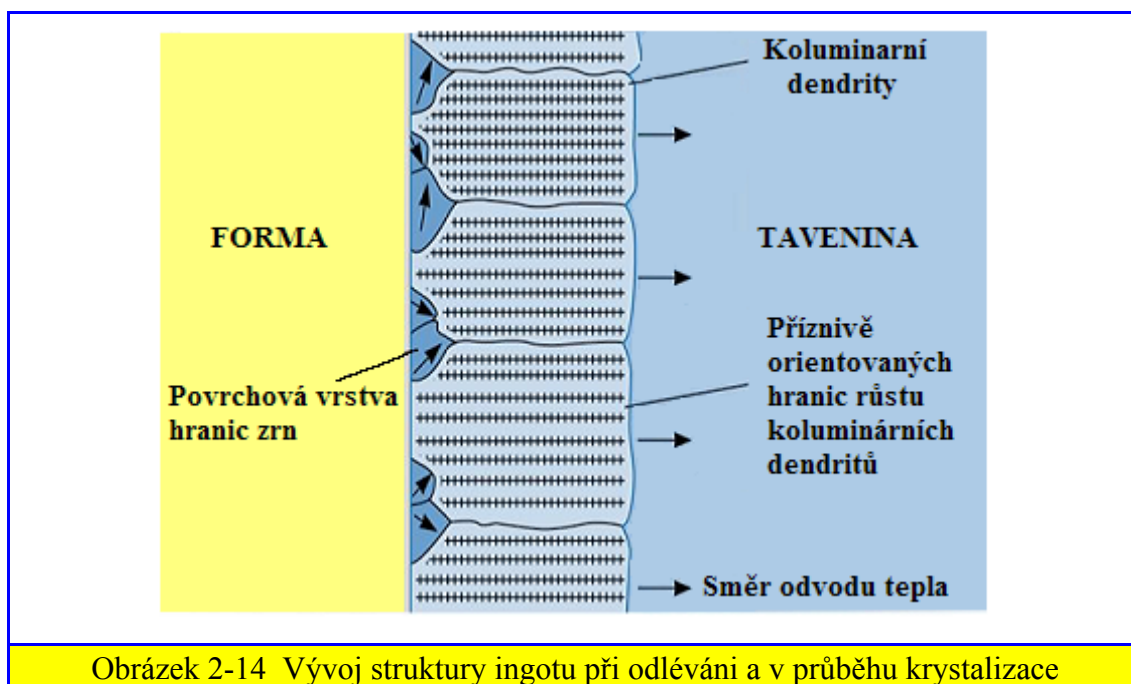
Obrázek 2-13 Vývoj struktury ingotu při odlévání a v průběhu krystalizace

Obrázek č. 2-12 ukazuje vývoj struktury ingotu při odlévání a v průběhu krystalizace.

- nukleace a její začátek
- rovnoosé krystaly vytvářející lící strukturu
- růst kolumnárních dendritů s oblasti taveniny ve střední partii
- kolumnární dendrity s oblasti poliendryckých zrn

Krystalizací rozumíme děj (odpovídající fázové přeměně), při němž z původní tekuté fáze vzniká tuhá fáze krystalického charakteru. U čistých kovů, slitin o eutektické koncentraci a u slitin o koncentracích odpovídajících chemické sloučenině probíhá krystalizace za určité stálé teploty tuhnutí. Ostatní slitiny krystalizují v určitém rozmezí teplot, daném vzdáleností likvidu od solidu v rovnovážném diagramu. Během krystalizace se uvolňuje skupenské teplo tuhnutí.

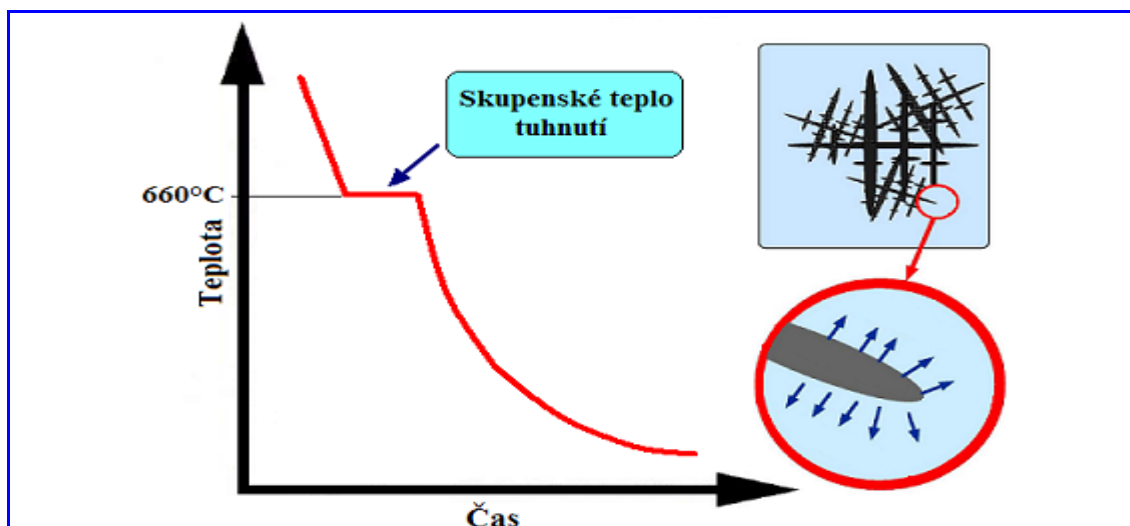
Příčinou krystalizace je snaha kovu nebo slitiny dosáhnout při změně teploty stabilního stavu. Tento stav je charakterizován minimální volnou entalpií.



2.3.2.1 Krystalizace hliníku a jeho slitin

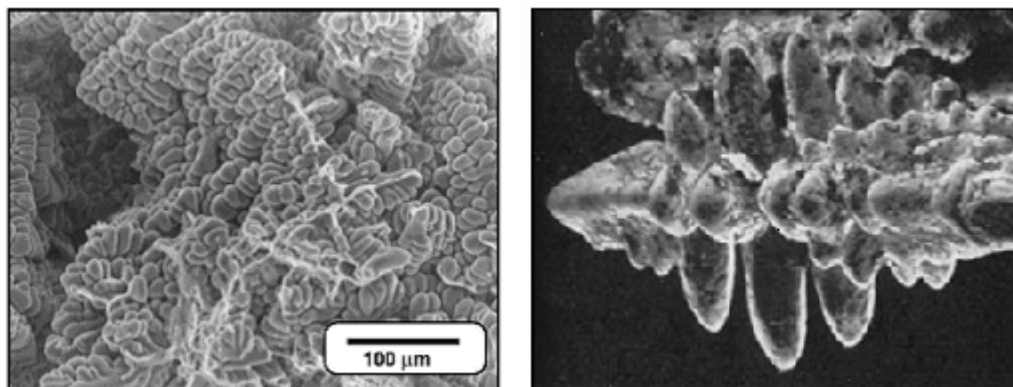
Postup tuhnutí slitin čistého hliníku je velmi ovlivněn vysokou tepelnou vodivostí (např. u technicky čistého hliníku 99% dochází za tuhnutí v pískové formě k výraznému růstu dendritů). Během tuhnutí rostou dendrity velmi pozvolna, ale jen do té chvíle, než se začnou navzájem omezovat. Tavenina, která zůstane uzavřena mezi větvemi dendritů, se nemůže během smršťování přemísťovat, což má za následek vytváření ojedinělých staženin, které jsou rozptýleny po celém vnitřním prostoru odlitku.

Toto tuhnutí je charakteristické pro pískové formy. Při tuhnutí v kovové formě je postupující krystalické pásmo velmi úzké, čímž se snižuje nebezpečí vytvoření vnitřních staženin mezi větvemi dendritů.



Obr. 2-15 Křivka tuhnutí a chladnutí čistého hliníku s ukázkou růstu dendritů.

Krystalizace taveniny čistého kovu, viz obr. 2-15 nebo eutektického složení nastává v okamžiku, kdy teplota taveniny dosáhne rovnovážné krystalizační teploty (u čistého hliníku tj. 660 °C). Tím se začne uvolňovat skupenské krystalizační teplo a na křivku chladnutí nedochází k postupnému snižování teploty, ale vytváří se teplotní prodlevu. Ta trvá až do okamžiku ztuhnutí veškeré taveniny odlitku.



Obr. 2-16 Dendrity Al-Si-Mg

Všechny poznatky uvedené v rešeršní části práce byly uplatněny při řešení vlastních experimentů.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Experimenty prováděné v této diplomové rámci byly zaměřeny na sledování dilatačních vlastností odlitků ze slitin hliníku odlévaných do slévárenských forem z CT směsi:

- a) Sledování časových závislostí dilatačních křivek při odlévání, tuhnutí a chladnutí odlitků jednoduchého tvaru ($\varnothing 60 \times 70$ mm) z vybraných slitin hliníku (Al, AlSi1, AlSi2, AlSi3, AlSi4, AlSi5, AlSi6, AlSi7, AlSi8, AlSi9, AlSi10, AlSi11, AlSi12, AlSi15, AlSi20, AlSi25, AlSi29) při určitém přehřátí taveniny a současně byly sledovány křivky tuhnutí a chladnutí odlévané slitiny.
- b) Odlévání tvarově jednoduchého kuželového odlitku též z těchto slitin hliníku s následným vyhodnocením tvorby, vzhledu a rozměrů vnitřních a vnějších staženin.

Pro výrobu forem byla použita formovací směs – CT. Záměry těchto experimentů vychází z uplatnění slévárenských slitin hliníku při výrobě odlitků jak do kovových, tak do pískových forem. Odlitky vyráběné v pískových formách nebo ve formách kovových při gravitačním lití je nutno nálitkovat. Tato problematika je řešena na Katedře strojírenské technologie, FS TU v Liberci v rámci výzkumného záměru MSM 4674788501 “Optimalizace vlastností strojů v interakci s pracovními procesy a člověkem” jako technologická část projektu: “Výzkum krystalizace a dilatačních vlastností slitin hliníku”.

3.1 Popis měřícího zařízení pro sledování dilatací

Měřící zařízení dilatací slitin při jejich tuhnutí se skládá ze dvou konstrukčních celků dilatometr s převodníkem Crystalograph PC4T21 (polské provenience), viz obr. 3-1, základová deska s pohyblivým měřícím rámem, viz obr. 3-2.

Pohyblivý měřící rám je umístěn na otočných válečkách, které zajišťují vedení rámu v horizontálním směru vůči základové desce. Na základové desce je umístěn kruhový kovový rám s vnitřním průměrem 100 mm a výškou 100 mm. Do kruhového rámu se vkládá slévárenská forma s otevřenou dutinou pro odlitek tvaru válce $\varnothing 60$ mm a výšky 70 mm. V polovině výšky kruhového rámu jsou dva protilehlé otvory pro vložení dvou křemenných trubiček o průměru 5 mm - jejich osa protíná kolmo osu válce. Trubičky přecházejí do vnitřního prostoru válce přibližně o 7 mm. Ve dně kruhového,

tj. v místě formy, které odpovídá tepelné ose odlitku se vkládá termočlánek NiCr-Ni zasahující svým měřicím obaleným koncem do úrovně vložených křemenných trubiček. Termočlánek snímá teplotu tuhnoucí a smršťující se taveniny.

Pohyblivý rám je složen ze dvou ocelových ramen, na kterých jsou pomocí svěrného spoje upevněny křemenné trubice o průměru 10 mm, sloužící jako vedení pohyblivého měřicího rámu a současně slouží jako spojovací prvek obou ramen. Na prvním rameni je objímkou uchycena jedna z trubiček průměru 5 mm. Na druhém rameni, též pomocí objímky, je upevněn indukční snímač polohy o rozsahu 10 mm. Pohyblivý dotyk snímače je opřen o vnější konec křemenné trubičky průměru 5 mm. Snímač je držen v nulové výchylce pružinkou umístěnou uvnitř snímače. Pohyblivý dotyk snímače je pomocí magnetu pevně opřen o vnější konec křemenné trubičky o průměru 5 mm opatřené kovovou koncovkou.

Snímaná hodnota dilatace je indukčním snímačem dráhy převedena na analogový signál elektrické veličiny. Signál je dále upraven a převeden A/D převodníkem EDK 87 na digitální signál, který je přenesen do PC. V počítači je signál uložen pro další zpracování. Snímaná teplota, resp. analogová veličinu elektrického napětí je upravena A/D převodníkem DMP 506 na digitální signál, který je dále uložen do PC. Naměřené hodnoty dilatací jsou zobrazovány v závislosti na čase a interpretovány v grafické podobě.

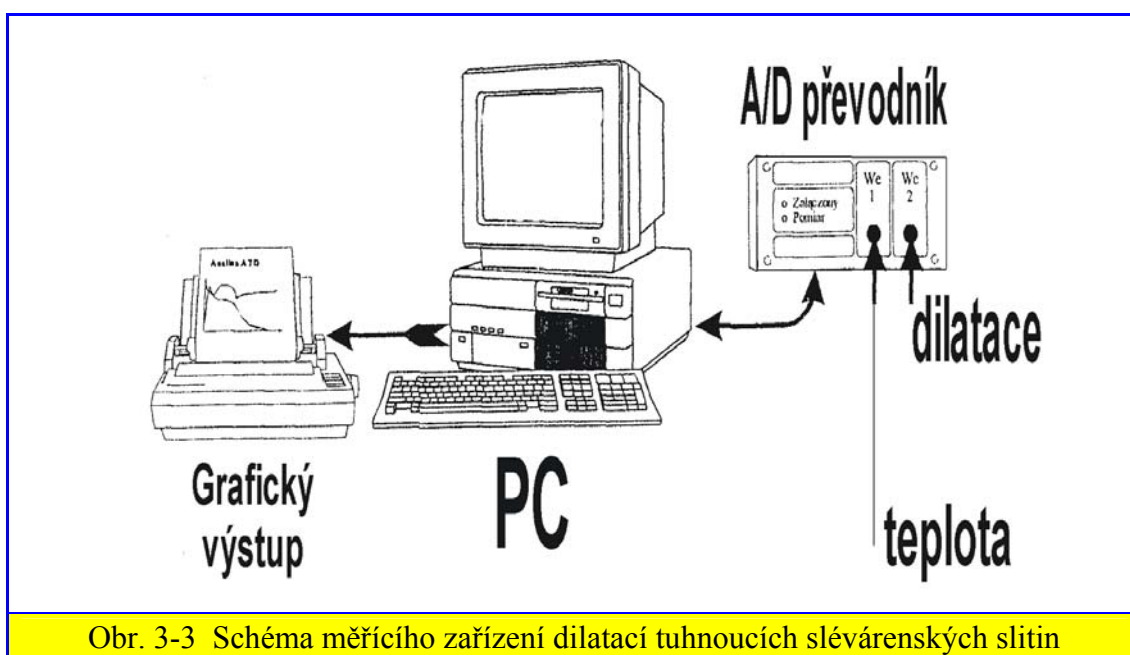


Obr. 3-1 Dilatometr s převodníkem měřicího zařízení CRYSTALOGRAPH PC4T2L (polské provenience)



Obr. 3-2 Pohled na měřicí rám a základovou desku s formou z CT směsí s termočlánkem.

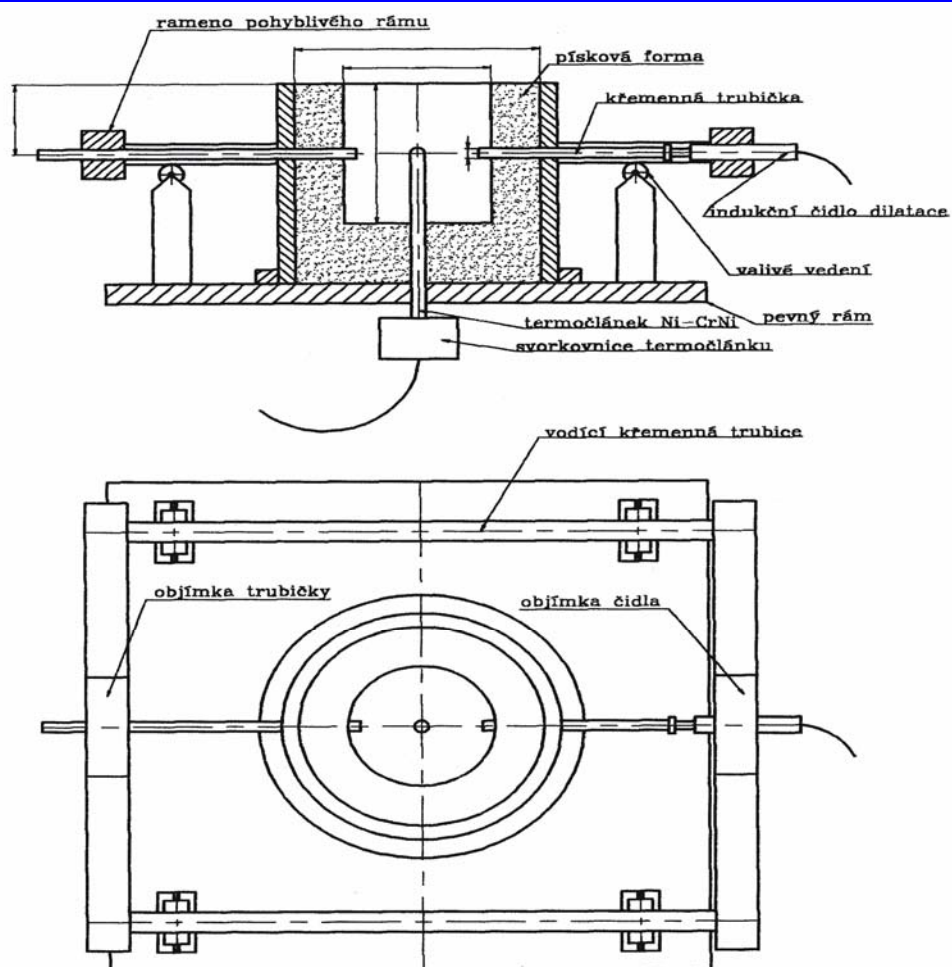
Oba tyto hlavní prvky měřicího zařízení jsou doplněny o PC. Schéma celého měřicího zařízení je patrné ze schématu na obr. 3-3.



Obr. 3-3 Schéma měřicího zařízení dilatací tuhnuících slévárenských slitin



Obr. 3-4 Pohled na obrazovku PC s nastavením parametrů pro snímání dilatace



Obr. 3-5 Schéma měřícího pohyblivého rámu

3.2 Charakteristika použitých slévárenských forem

Pro výrobu slévárenských forem pro sledování dilatací byla použita CT směs, jejíž vlastnosti jsou uvedené v tabulce 3.2.

Tabulka 3.2 Přehled vlastností formovací směsi CT

Formovací směs CT- SiO ₂				
Charakteristika směsi	Střední velikost zrna d_{50} [mm]	Hustota [kg.m ⁻³]	Prodyšnost [j.p.Si]	Pevnost v tlaku [MPa]
Křemenný písek Střeleč T2S, 4 % vodního skla (m=2,4), vytvrzeno CO ₂	0,27	1500	460	0,78
b_F [W.s ^{1/2} .m ⁻² .K ⁻¹]	λ_F [W..m ⁻¹ .K ⁻¹]	c_F [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	a_F [m ² .s ⁻¹]	
1168	1,06	862	$8,20 \cdot 10^{-7}$	

Formy z této směsi byly zhotoveny pro odlitek Ø 60 x 70 mm u kterého se měřily a dilatace a teploty. Pro oba dva experimenty bylo zhotoveno **10** forem.

Formy byly vyrobeny ručním formováním. Model válečku byl položen na modelovou desku s rámem. Rám představoval válec o Ø100 mm a o výšce 100 mm. Do dna modelu byla zasazena křemenná trubička pro termočlánek. Tato trubička byla zasazena před nasypáním formovací směsi, potom byla do rámu nasypána formovací směs a následně vytvrzena plynem CO₂. Po vytvrzení byl vyjmut model z rámu. Tyto formy byly použity pro následné lití odlitků.

3.3 Popis prováděných měření dilatací

Měření dilatací odlitků při jejich tuhnutí a teploty bylo prováděno výše uvedeného měřicího zařízení. Tyto hodnoty byly sledovány v závislosti na čase. Jak je patrné z obr. 3-2, forma z CT směsi se vloží do kruhového rámu.

Do formy se ve spodní části vsune termočlánek Ni-CrNi, který je dále přes svorkovnici připojen k registrační jednotce znázorněné na obr. 3-3.

Dále je na valivé vedení položí pohyblivý rám, do kterého je pevně z jedné strany připevněna křemenná trubička pomocí objímky. Tato křemenná trubička je zasunuta do formy, kde přesahuje asi o 5 mm. Z druhé strany je také zasunuta křemenná trubička do formy, která je k pohyblivému rámu připevněna pomocí objímky čidla. Na konec trubičky je nasazen magnet, díky kterému se trubička připevní na indukční čidlo

dilatace, které je pomocí konektoru dále připojeno k registrační jednotce. Tato jednotka je připojena pomocí paralelního konektoru k PC, ve kterém jsou zaznamenávány informace velikosti dilatací a teplot tuhnutí a chladnutí.

Pro odlévání byl použit silumin. Potřebné množství Al a Si bylo vypočítáno a naváženo a smícháno. Tavení bylo prováděno o v komorové elektrické peci. Po natavení byla tavenina metalurgicky ošetřena (rafinována pomocí rafinační soli Ecolsal, nebo T3), promíchána a zbavena strusky. Teplota odlévané slitiny byla měřena pomocí termočlánu NiCr-Ni a registrována prostřednictvím digithermometru GTH 1150 (made in Germany).

Do formy byla tavenina odlita **kov odléváme s 50, 100 a 150°C přehřátím oproti předpokládané teplotě likvidu**. Po odlití taveniny do formy bylo zapnuto měřicí zařízení a byl sledován časový průběh dilatací tuhnoucí taveniny a její teplota.

V okamžiku, kdy termočlánek ve formě signalizoval teplotu 520°C. Od tohoto a začne zaznamenávat změny teplot a dilatací. Tyto změny jsou zaneseny do grafických závislostí na čase. Měření program ukončí v tu chvíli, když termočlánek naměří uvnitř dutiny formy dosáhne teplotu 450°C. Vybrané charakteristiky dilatací a teplot tuhnutí a chladnutí jsou znázorněny v **příloze 1**.

Podmínky experimentů a použité slitiny jsou uvedeny v tabulce 3.3.

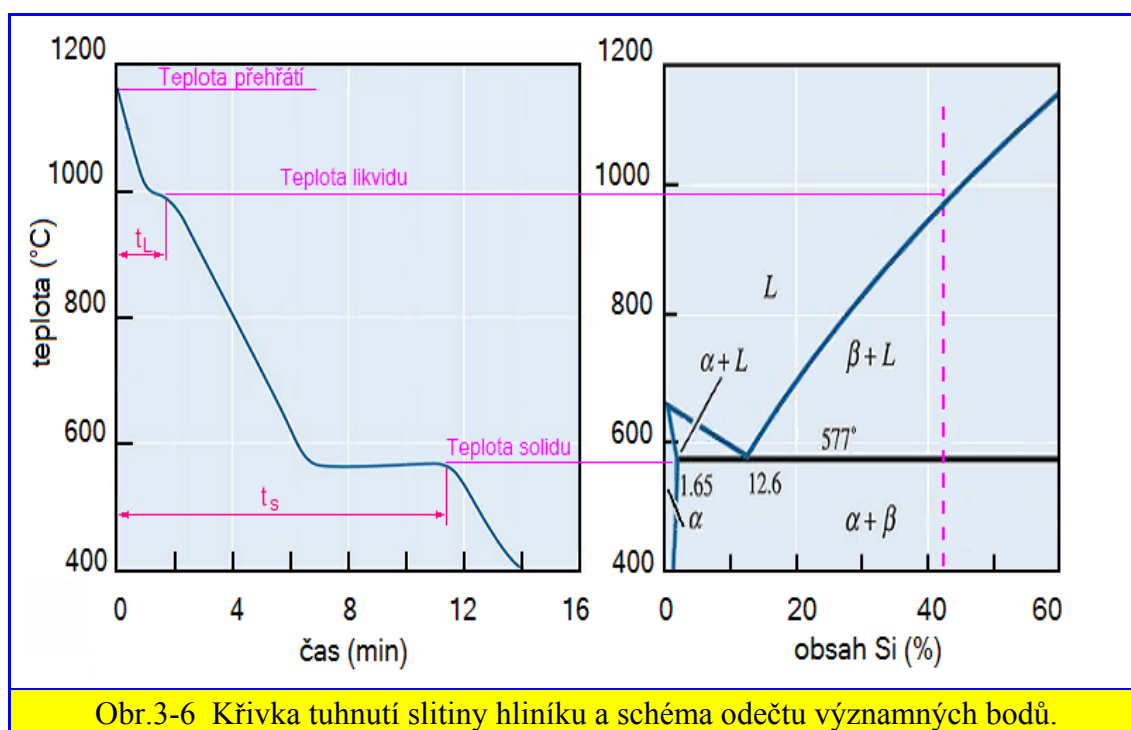
Tabulka 3.3 Podmínky prováděných experimentů

Číslo měření	Typ slitiny	Chemické složení hmot [%]				Lící teplota [°C]	L _{max} [mm]	L _{min} [mm]
		Si	Mg	Cu	Mn			
1	AlSi3	3	0,009	0,004	0,004	760	0,297	0
2	AlSi3	3	0,009	0,004	0,004	870	0,282	0
3	AlSi3	3	0,009	0,004	0,004	690	0,041	-0,278
4	AlSi7	7	0,022	0,010	0,011	750	0,155	-0,012
5	AlSi7	7	0,022	0,010	0,011	860	0,322	0
6	AlSi7	7	0,022	0,010	0,011	660	0,136	-0,057
7	AlSi12	12	0,038	0,018	0,019	790	0,117	-0,023
8	AlSi12	12	0,038	0,018	0,019	630	0,091	-0,108
9	AlSi12	12	0,038	0,018	0,019	730	0,225	0
10	AlSi15	15	0,034	0,021	0,027	670	0,166	-0,012
11	AlSi15	15	0,034	0,021	0,027	770	0,277	0
12	AlSi15	15	0,034	0,021	0,027	820	0,194	0

3.4 Vyhodnocení prováděných experimentů

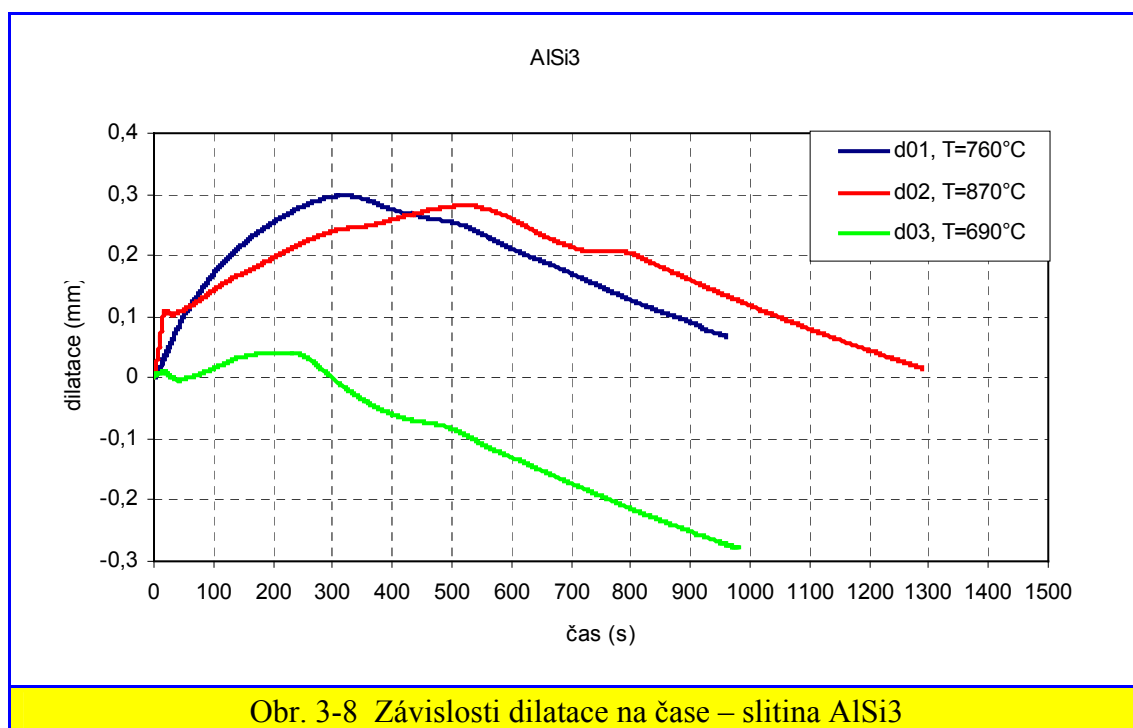
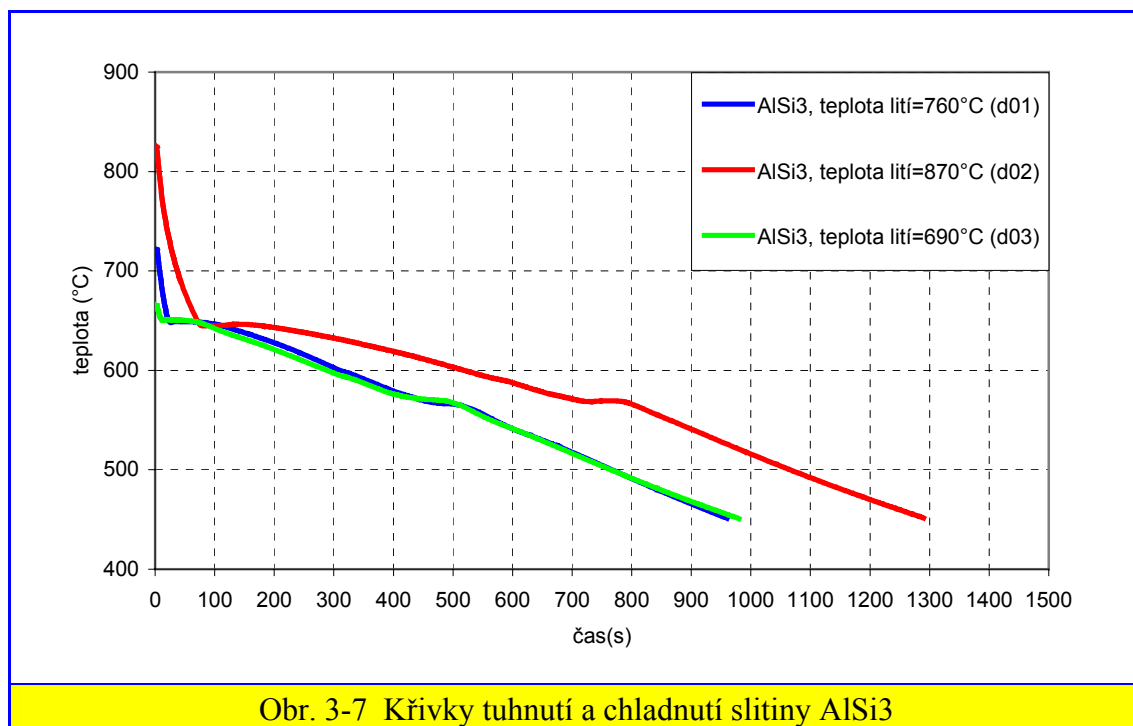
3.4.1 Vyhodnocení průběhu tuhnutí

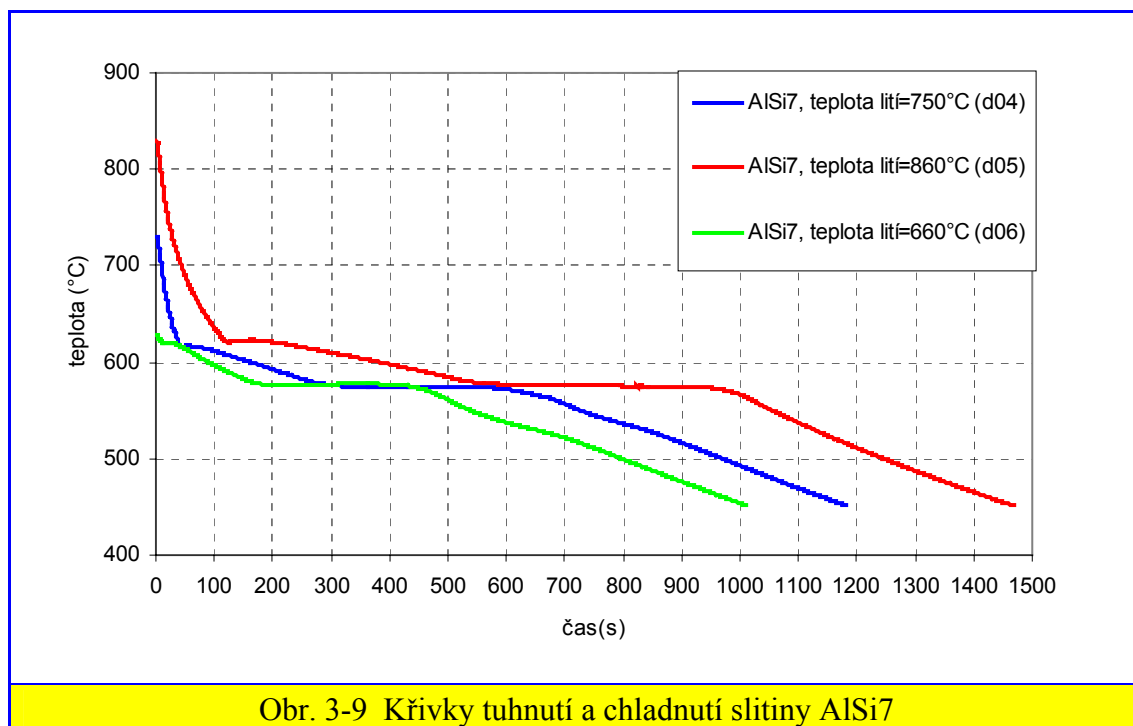
Forma ve slévárenských procesech z tepelného hlediska je akumulátorem a vodičem tepla. Který podíl této funkce je vyšší, o tom rozhoduje materiál, velikost, teplota, konstrukce formy atd. Po odlití taveniny do dutiny formy dojde ke styku tekutého kovu s formou a tím teplota formy stoupá a teplota tuhnoucí taveniny klesá. Klesne-li teplota tekutého kovu na teplotu počátku krystalizace, nastává přechod kovu ze skupenství kapalného do skupenství pevného, a to postupně od stěny formy směrem k tepelné ose odlitku.



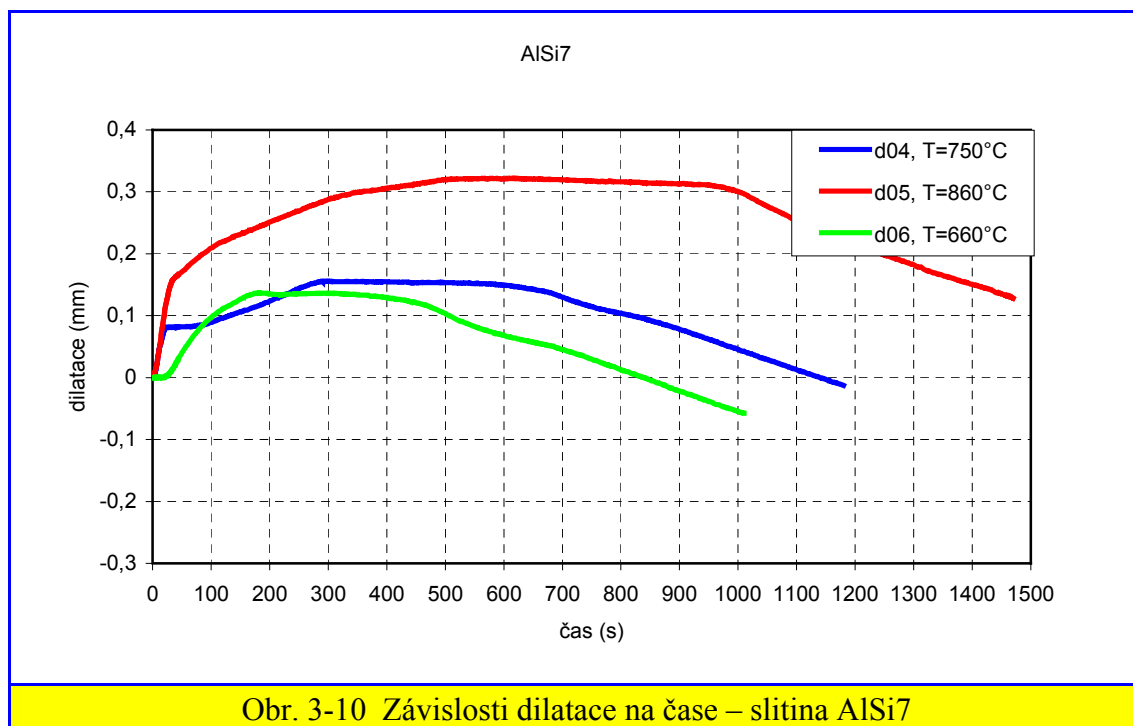
Obr.3-6 Křivka tuhnutí slitiny hliníku a schéma odečtu významných bodů.

Čím rychleji odvádí forma z kovu teplo, tím rychleji kov krystalizuje, což se značně projeví na charakteru krystalizace (velikost zrna) a také na vlastnostech odlitku. Rychlost odvodu tepla z tuhnoucí taveniny do formy je závislá na tepelně fyzikálních vlastnostech a konstrukci formy. Podmínky pro přestup tepla z kovu do formy během odlévání, tuhnutí a chladnutí odlitku se neustále mění.

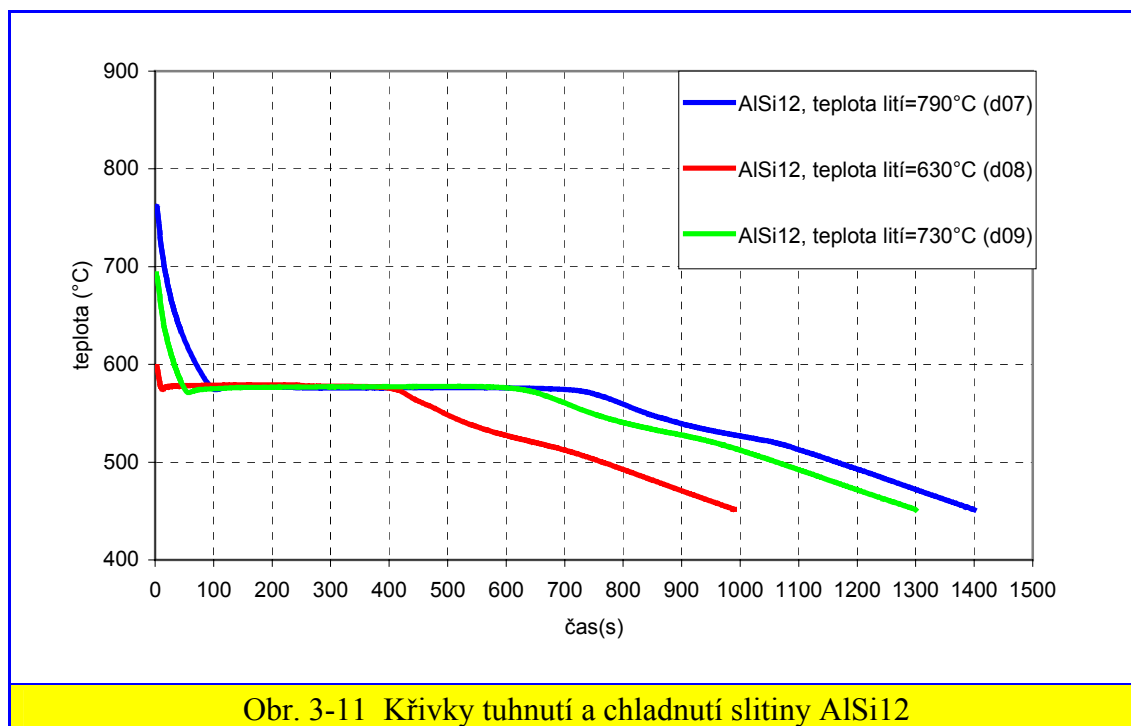




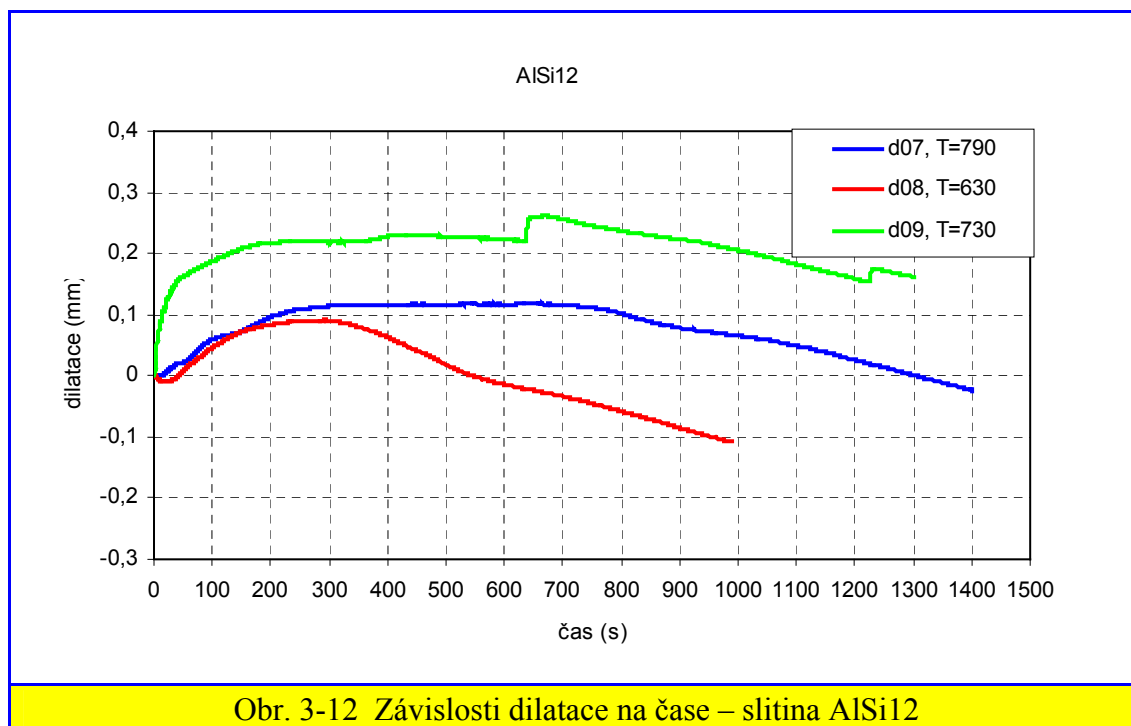
Obr. 3-9 Křivky tuhnutí a chlazení slitiny AlSi7



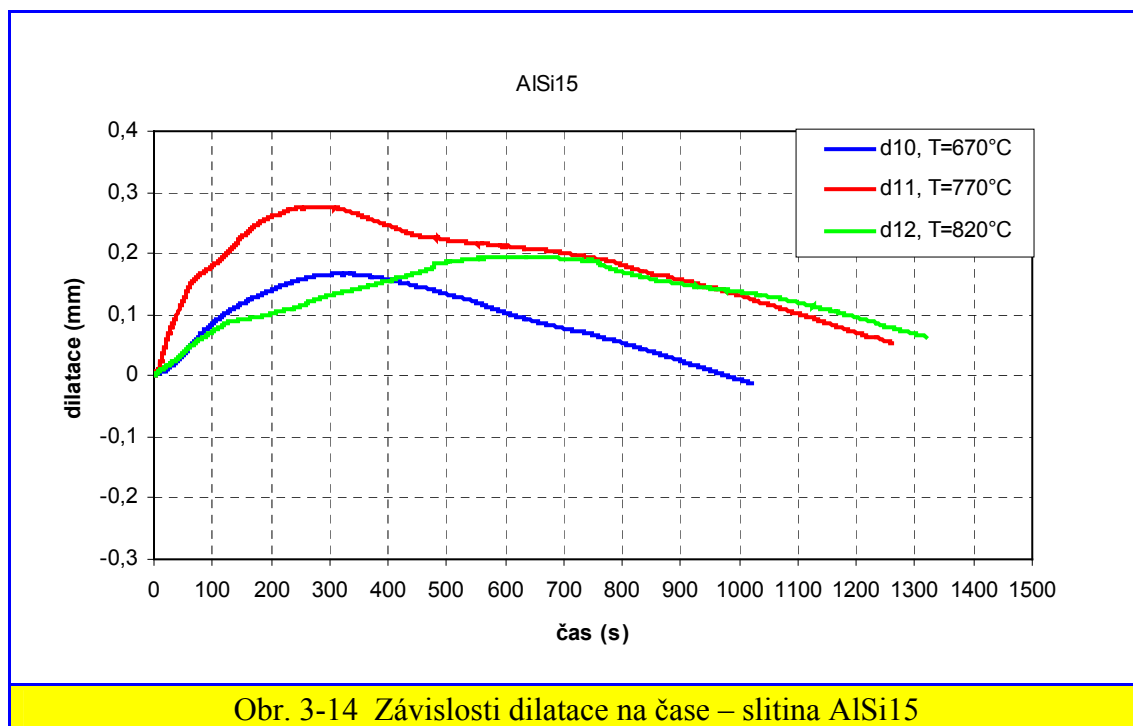
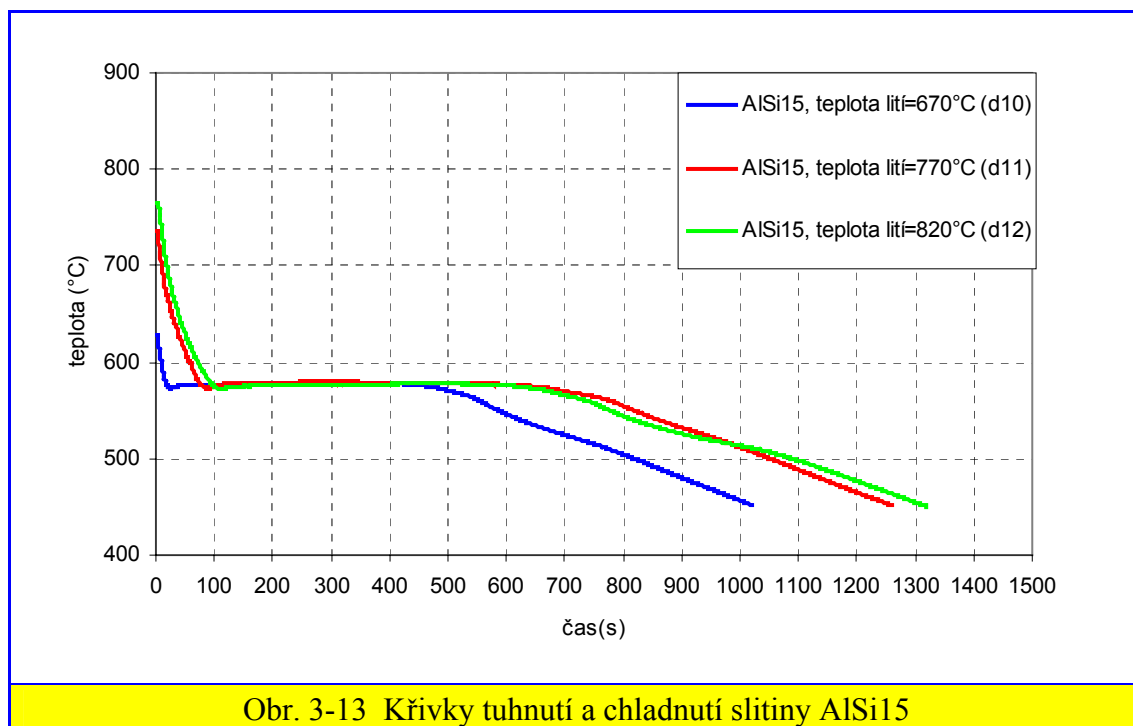
Obr. 3-10 Závislosti dilatace na čase – slitina AlSi7



Obr. 3-11 Křivky tuhnutí a chladnutí slitiny AlSi12



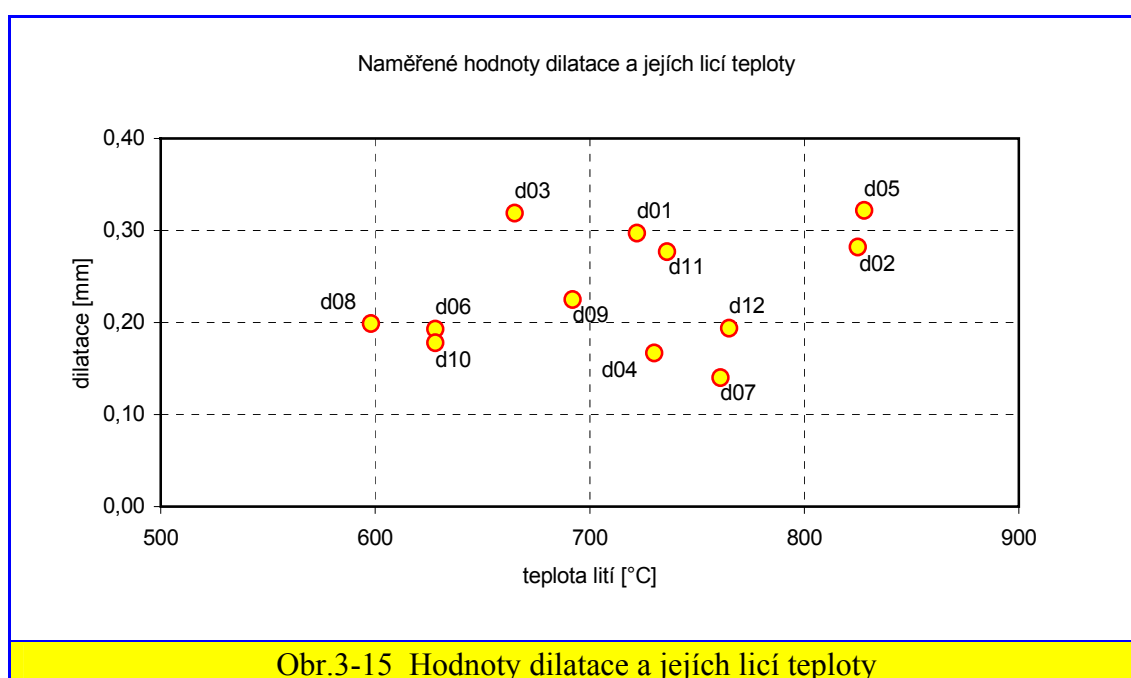
Obr. 3-12 Závislosti dilatace na čase – slitina AlSi12



3.4.2 Hodnocení dilatací

Na obrázcích 3-7. – 3-14 jsou uvedeny průběhy teplot a dilatace pro stejné chemické složení slitin hliníku prováděné při různých teplotách lití. Z grafických závislostí je patrné, že dilatace má největší nárůst při tuhnutí, tj. mezi teplotou likvidu a solidu (křivka krystalizace je měřena v tepelné ose odlitku) a svého maxima dosahuje u konce tuhnutí, kde nastává zvrát a vlivem chladnutí odlitku začínají vznikat vnitřní pnutí, která mají za následek smršťování odlitku.

Naměřené celkové hodnoty dilatace ($L_{\max}-L_{\min}$) a jejich lící teploty ukazuje obr. 3-15.



Utváření odlitků ve slévárenské formě je z tepelného hlediska spojeno s uvolňováním tepla při tuhnutí, popř. chladnutí odlitku, resp. ze ztuhlé vrstvy odlitku a ze sdílení tepla z tuhnoucí taveniny přes ztuhlou vrstvu odlitku do slévárenské formy.

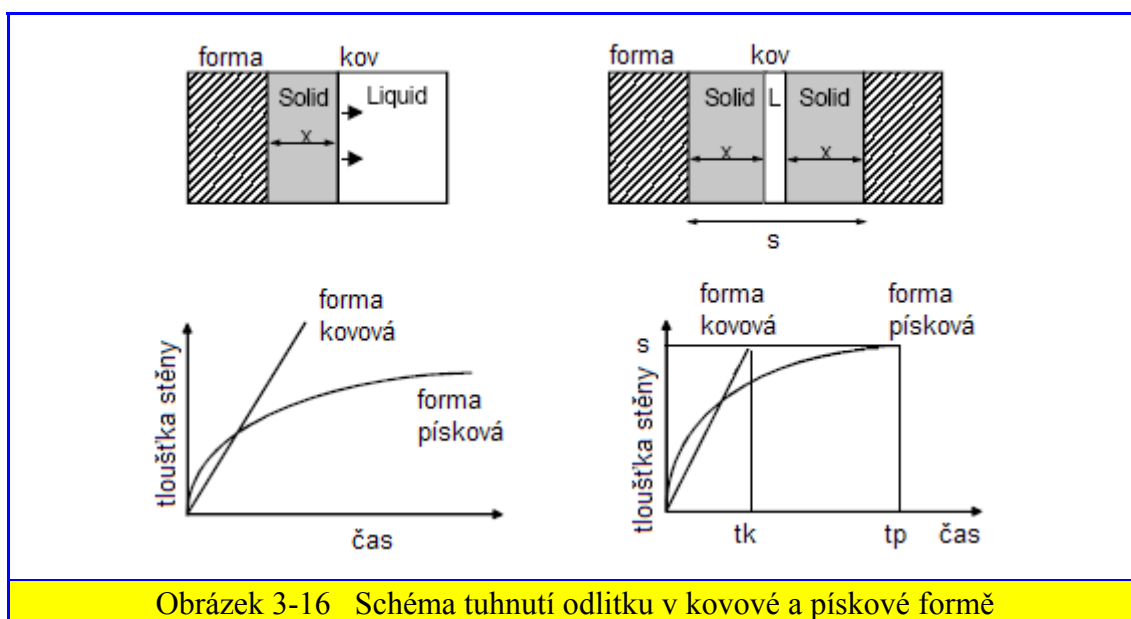
Podle Schwarzovo řešení průběh tuhnutí vykazuje parabolickou závislost

$$x = k \cdot \sqrt{t} \quad (3.4.1)$$

kde: x - tloušťka ztuhle vrstvy [m]

k - konstanta tuhnutí [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}$]

t - čas [s]



Podle toho pravidla lze určit konstantu tuhnutí pro provedené experimenty

$$k = \frac{x}{\sqrt{t}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}] \quad (3.4.2)$$

kde:

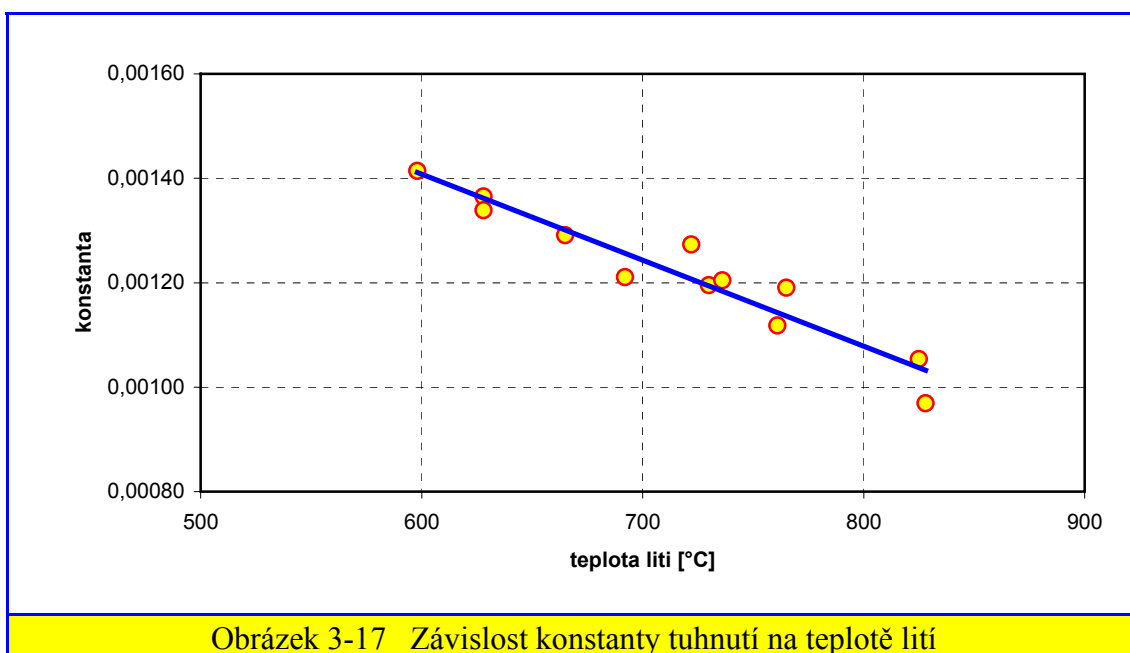
$$x = \frac{d}{2} \text{ co při průměru odlitku } d = 60\text{mm, daje } x = 0,03\text{m.}$$

t - čas krystalizace podle tab.3-4

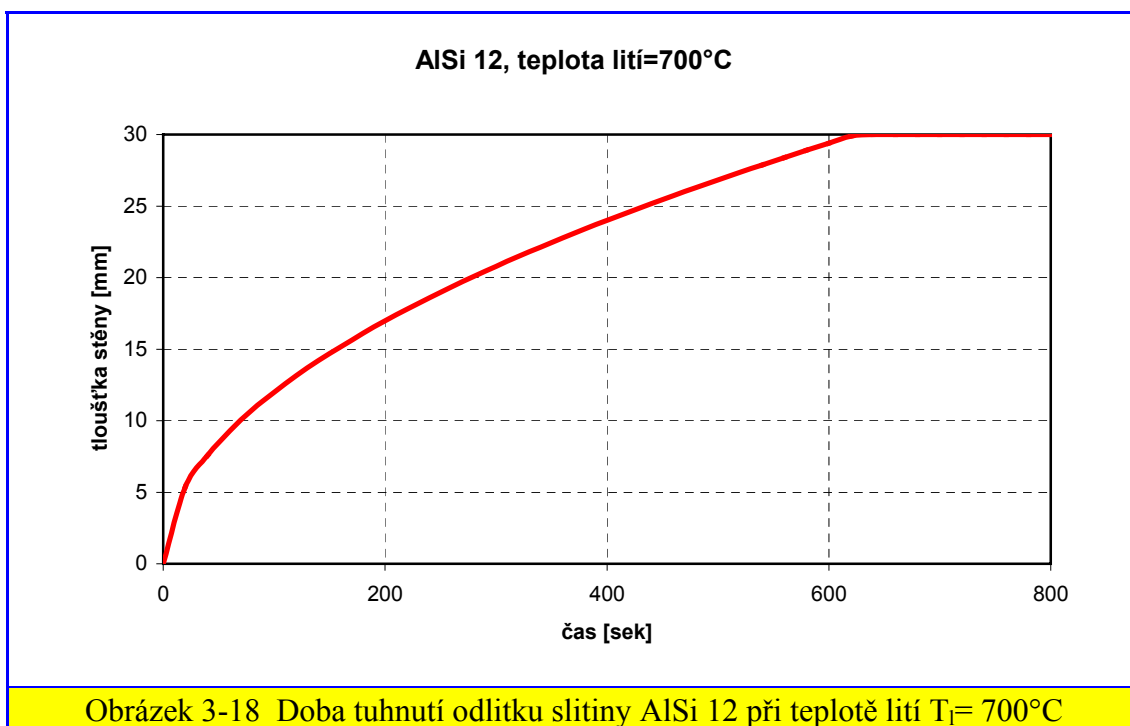
Tabulka 3-4

číslo zk.	teplota lití [°C]	teplota lití [°K]	teplota kryst. [°C]	teplota kryst. [°K]	teplota likvidu [°C]	čas likvidu [sek]	teplota solidu [°C]	čas solidu [sek]	čas kryst. [sek]	konstanta tuhnutí [ms ^{-1/2}]
d01	722	995	567	840	649	30	566	585	555	0,00127
d02	825	1098	569	842	645	100	570	910	810	0,00105
d03	665	938	570	843	650	20	570	560	540	0,00129
d04	730	1003	574	847	616	54	574	684	630	0,00120
d05	828	1101	576	849	622	152	575	1110	958	0,00097
d06	628	901	577	850	620	17	577	500	483	0,00137
d07	761	1034	576	849	576	120	576	840	720	0,00112
d08	598	871	574	847	576	18	576	468	450	0,00141
d09	692	965	577	850	572	70	577	684	614	0,00121
d10	628	901	577	850	573	28	577	530	502	0,00134
d11	736	1009	578	851	573	110	577	730	620	0,00120
d12	765	1038	578	851	572	135	577	770	635	0,00119

Konstanta tuhnutí závislí nepřímo na teplotě litého kovu do formy co je uvedeno na obr.3-17

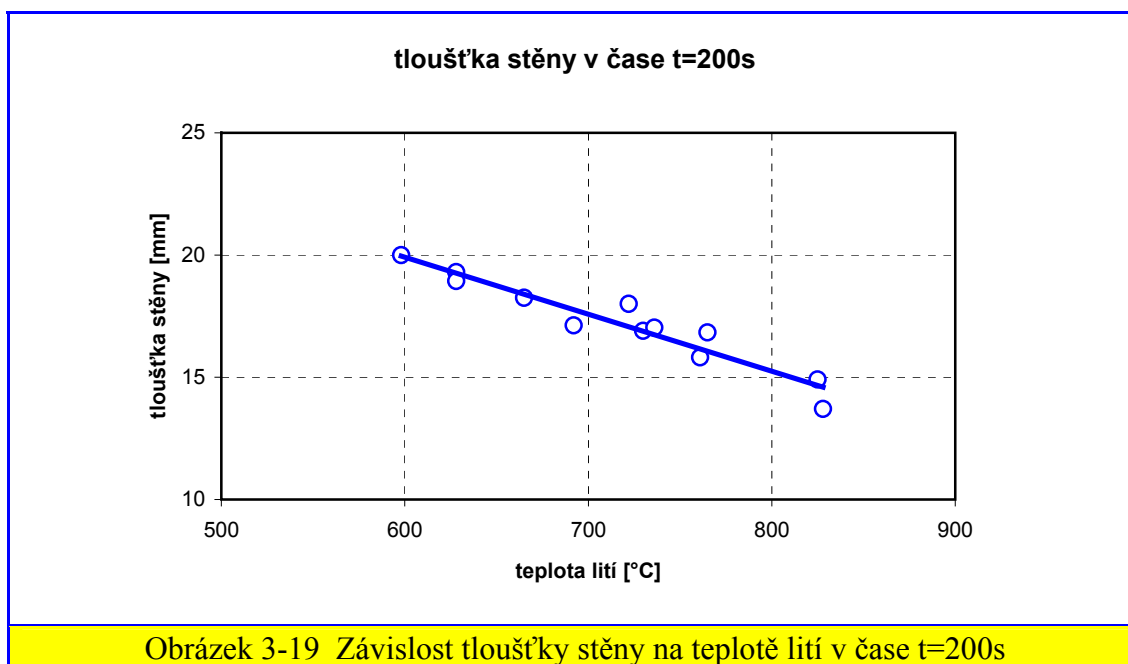


Spočítaná křivka doby tuhnutí slitiny AlSi 12 je uvedena na obr.3-18



Na základě toho řešení lze určit hodnotu tloušťky stěny v určitém čase tuhnutí odlitku v pískové formě při určitých teplotách litého kovu.

Pro další řešení bylo přijato $t = 200$ s. Výsledek je znázorněn na obr.3-19.



Dilatace odlitku v určitém okamžiku závislí na teple soustavy odlitek-forma a na tloušťce stěny vzniklé v tomto okamžiku.

Teplo soustavy obsahuje:

$$Q_{soust} = Q_{ochl} + Q_{skup} - Q_{for} \quad (3.4.3)$$

Teplo ochlazování je dáno vztahem:

$$Q_{ochl} = m \cdot c_L \cdot \Delta T = m \cdot c_L \cdot (T_{lití} - T_{odl}) \quad (3.4.4)$$

kde: m – hmotnost odlitku [kg]

c_L – měrná tepelná kapacita taveniny [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

$T_{lití}$ – teplota lití [$^{\circ}\text{C}$]

T_{odl} – teplota odlitku v přijatém okamžiku $t = 200$ s [$^{\circ}\text{C}$]

Přírůstek uvolněného tepla:

$$Q_{skup} = m_s \cdot L_{KR} \quad (3.4.5)$$

kde: m_s – hmotnost ztuhle částí odlitku [kg]

L_{KR} – latentní krystalizační teplo odlévaného kovu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]

Teplo odvedené formou:

$$Q_f = \alpha_D \cdot (T_{PO} - T_{PF}) \cdot S \cdot t \quad (3.4.6)$$

kde: α_D - součinitel přestupu tepla dotykem

T_{PO} - teplota povrchu odlitku

T_{PF} - teplota povrchu formy

S - styčná plocha mezi odlitkem a formou

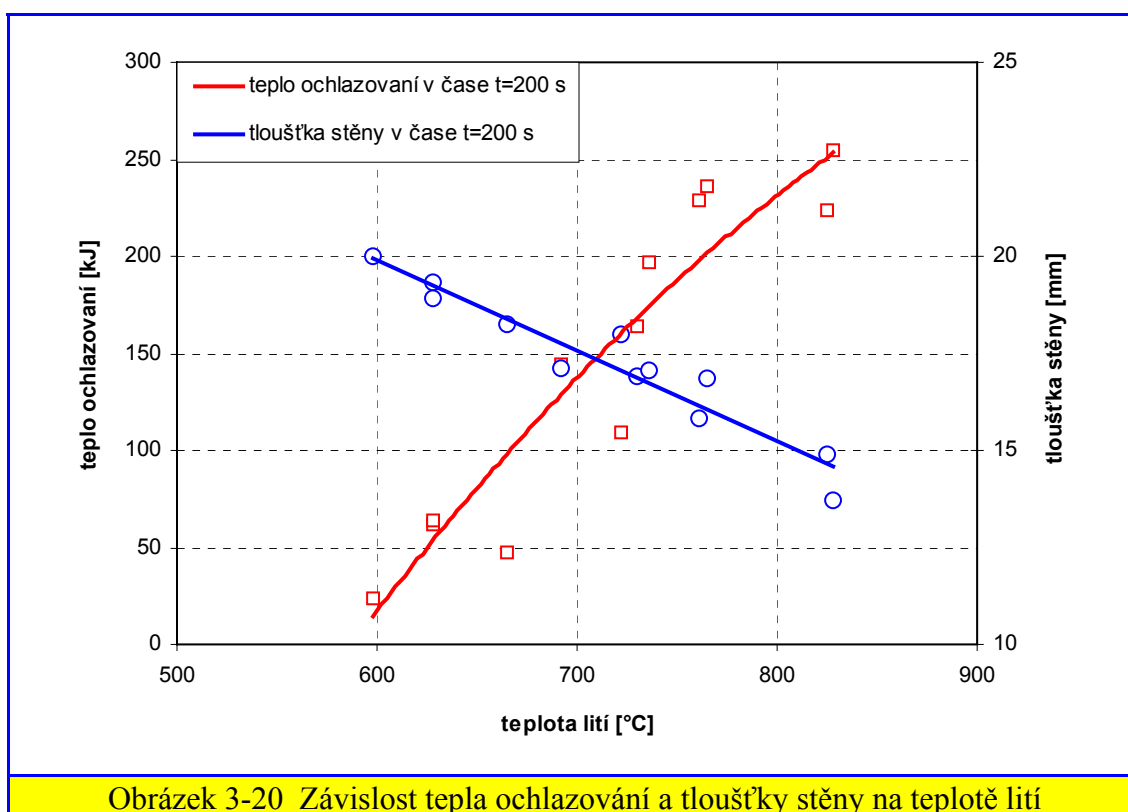
t - čas

Při vysoké teplotě přehřátí (vysoká teplota lití) a kratší době tuhnutí bude teplo ochlazovací mnohem vyšší než ostatní tepla (nedostatečná hmotnost ztuhlé částí odlitku a omezená tepelná vodivost pískové formy)

Proto v další části rešeršní práce v úseku tuhnutí je uvažováno teplo ochlazování jako hlavní příčinou dilatace.

Teplo ochlazování závislí na teplotě lití a teplotě krystalizace, která má většinou skoro stejnou hodnotu pro všechny použité slitiny.

Z tohoto důvodu počítáme závislost tepla ochlazování pouze na teplotě lití.



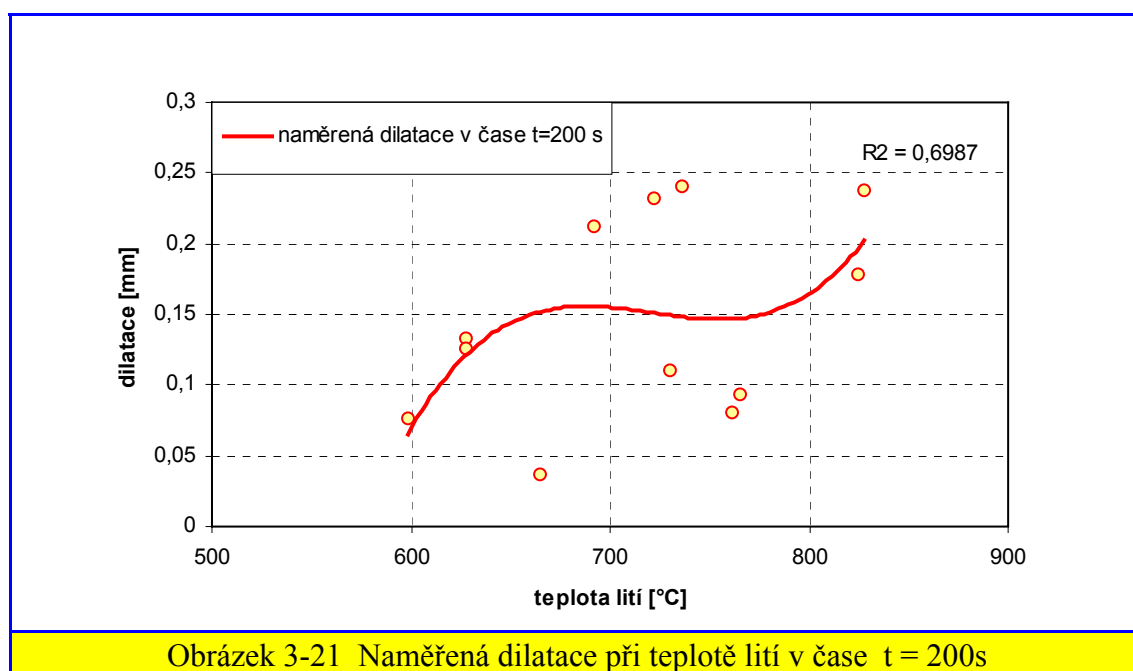
Křivky tepla ochlazování a tloušťky stěny jsou znázorněné na obrázku č. 3-20.

Největší dilatace nastává při určitých proporcích tloušťky stěny ku teplotě ochlazování.

Podle obrázku 3-20 jejich poměrné vysoké hodnoty jsou v oblasti teplot cca. 650-750°C.

V tab.3-5 Hodnoty odečtené s grafů tuhnutí a chladnutí odlitků při t=200s.

číslo zk.	teplota lití [°C]	teplota kryst. [°C]	teplota solidu	čas solidu [sek]	čas kryst. [sek]	tloušťka stěny [mm]	dilatace [mm]	dilatace [%]	teplota odlitku [°C]	Q-teplo ochl. [kJ]	teor. dilatace [%]
d01	722	567	566	585	555	18,01	0,232	0,387	634	109,5	0,320
d02	825	569	570	910	810	14,91	0,179	0,298	645	223,9	0,375
d03	665	570	570	560	540	18,26	0,037	0,062	627	47,3	0,285
d04	730	574	574	684	630	16,90	0,111	0,185	598	164,2	0,140
d05	828	576	575	1110	958	13,71	0,238	0,397	623	255,0	0,265
d06	628	577	577	500	483	19,30	0,133	0,222	578	62,2	0,040
d07	761	576	576	840	720	15,81	0,08	0,133	577	228,9	0,035
d08	598	574	576	468	450	20,00	0,076	0,127	579	23,6	0,045
d09	692	577	577	684	614	17,12	0,212	0,353	576	144,3	0,030
d10	628	577	577	530	502	18,94	0,126	0,210	577	63,4	0,035
d11	736	578	577	730	620	17,04	0,241	0,402	578	196,6	0,040
d12	765	578	577	770	635	16,84	0,094	0,157	575	236,4	0,025



Teoretická dilatace při určité tloušťce stěny ztuhlé v čase t = 200s a v rozmezí teplot

$$T_{\text{lití}} - T_{\text{odl}} \text{ je daná vztahem: } \Delta x = 2 \cdot \alpha \cdot x \cdot (T_{\text{lití}} - T_{\text{odl}}) \quad [\text{mm}] \quad (3.4.7)$$

kde: Δx - celková dilatace odlitku válcového tvaru [mm]

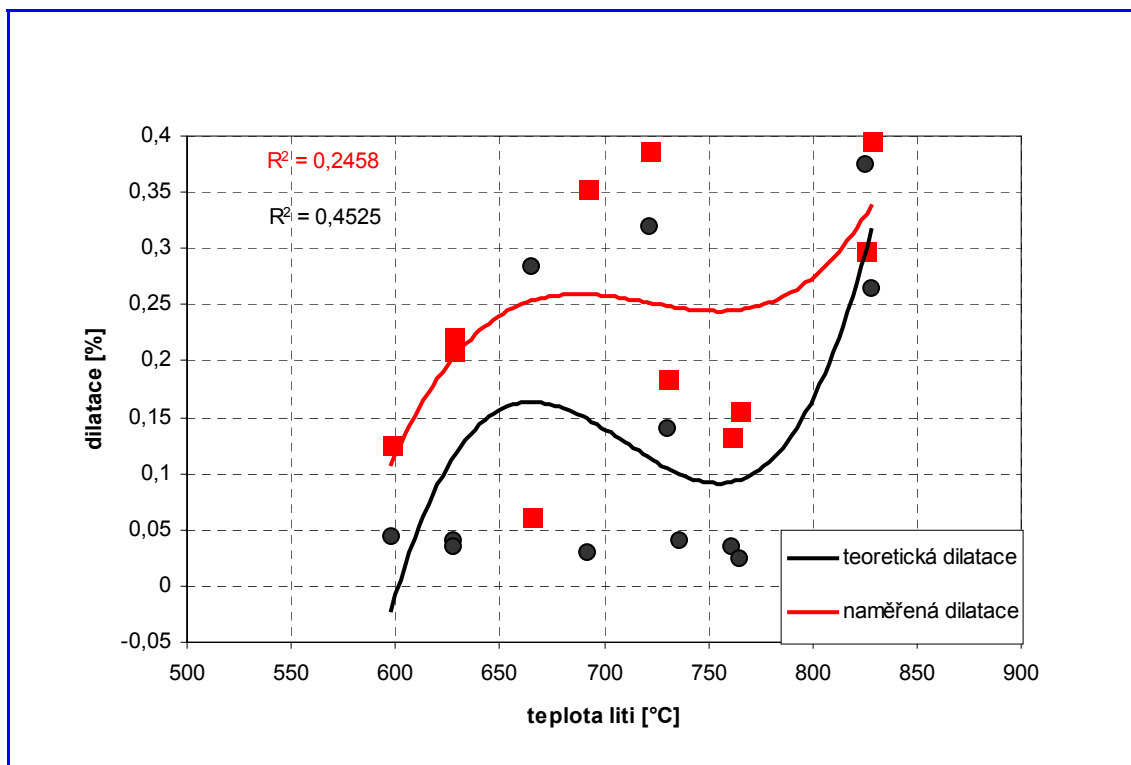
x - tloušťka stěny v čase t = 200s [mm]

α - součinitel tepelné roztažnosti [°C⁻¹]

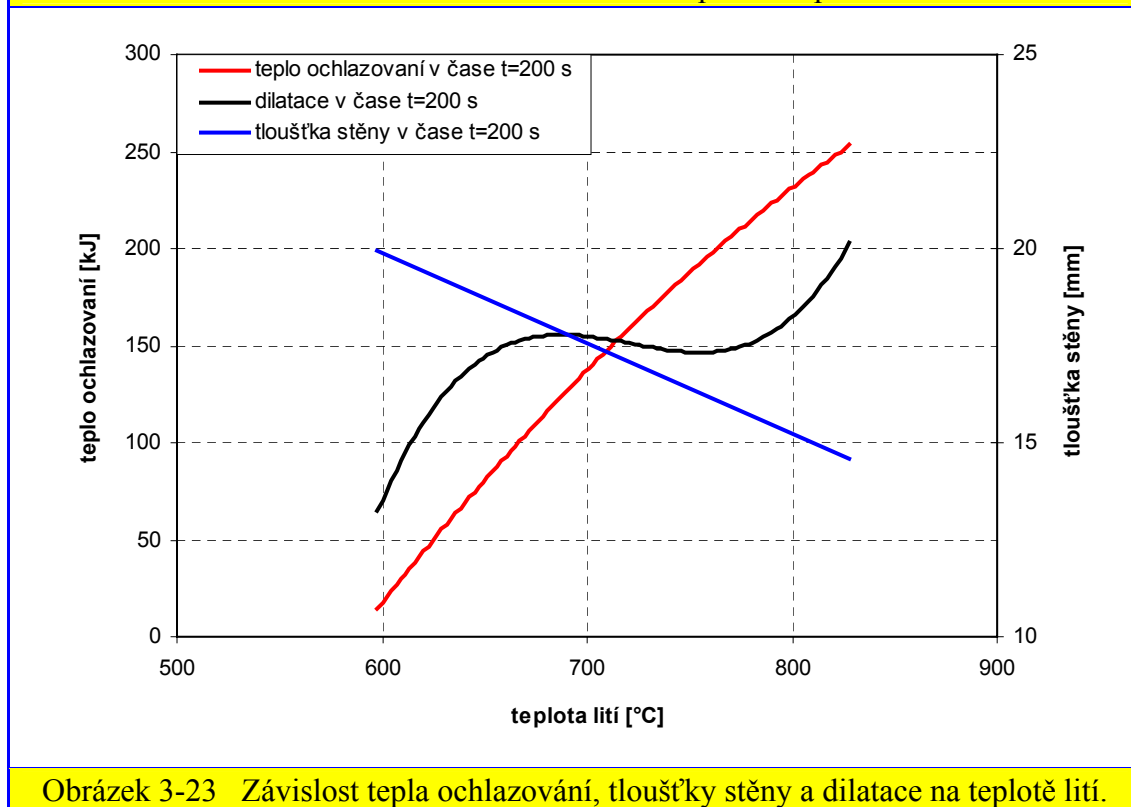
$T_{\text{lití}}$ - teplota lití kovu do formy [°C]

T_{odl} - teplota odlitku v čase t = 200s [°C]

Příměř dilatace vyražena v (%) :
$$\Delta x_{\%} = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.4.8)$$

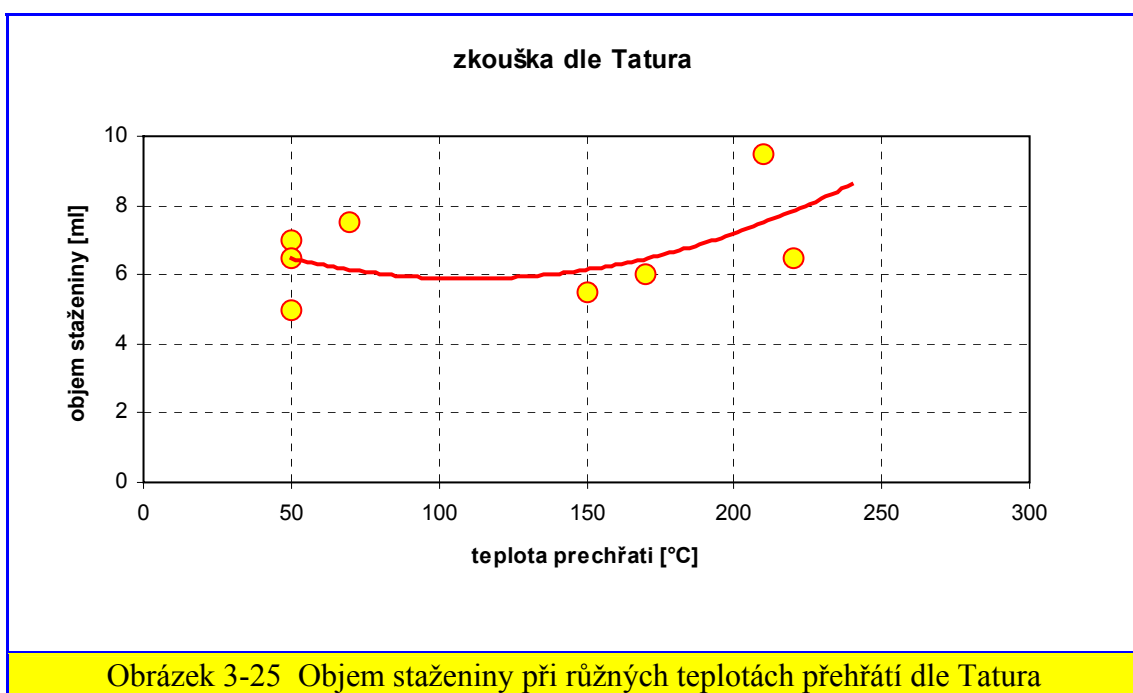
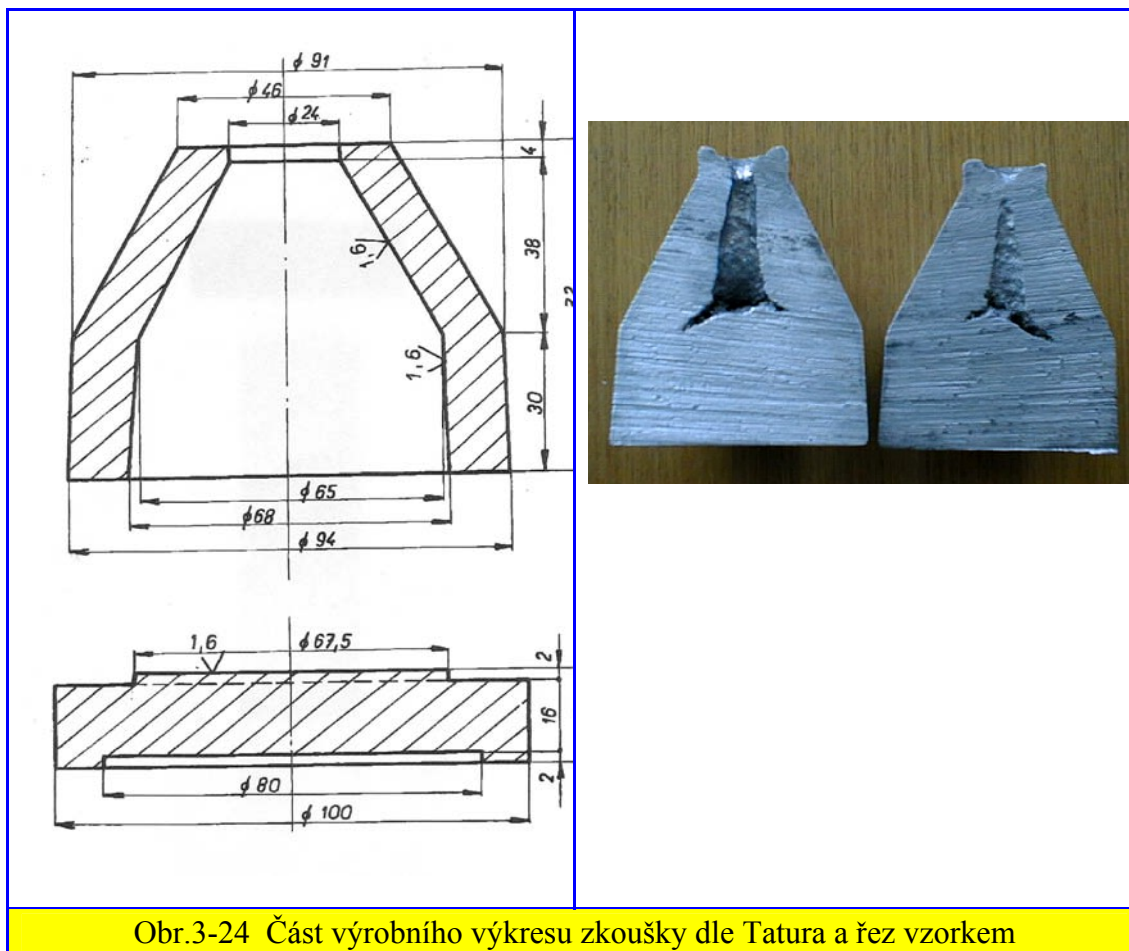


Obrázek 3-22 Závislost dilatace na teplotě lití při $t=200s$



Obrázek 3-23 Závislost tepla ochlazování, tloušťky stěny a dilatace na teplotě lití.

3.4.3 Hodnocení staženin



4. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výsledky obsažené v této diplomové práci přináší dílčí informace o chování siluminů (AlSi3, AlSi7, AlSi12 a AlSi15) během jejich ochlazování s ohledem na dilatační změny. V této diplomové práci byly experimenty zaměřeny na sledování vlivu přehřátí odlévané slitiny na charakter dilatací.

K tomuto účelu byly použity zkušební vzorky odlitků $\varnothing 60 \times 70$ mm. Z uvedených závislostí dilatací je zřejmý počáteční nárůst rozměru, který lze vysvětlit ztuhnutím tenké vrstvy odlitku, která je však ohřívána velkým množstvím tepla existující taveniny. Toto teplo s největší pravděpodobností roztáhne tenkou, ztuhlou vrstvičku ztuhlého odlitku. Tento nárůst dilatací lze sledovat až do okamžiku vzniku masivní tuhé vrstvy odlitku, kterou již ubývající množství tepla taveniny neprohřívá do takové míry, že by se projevila dilatace ztuhlé vrstvy odlitku.

Také dosti špatně vysvětlitelné jsou průběhy dilatací, viz slitina AlSi3 (teplota lití 870 a 760 °C). Lze předpokládat, že čím je vyšší teplota lití, tím je vyšší dilatace. Rozdíl u těchto dvou křivek je nepatrný z hlediska dosažení maximální dilatace. Celkem výrazné a očekávané výsledky dilatací jsou patrné z experimentů slitiny AlSi7. Největší dilatací cca 0,31 [mm] vykazuje slitina s teplotou lití 870 °C (teplota přehřátí X °C). Při teplotě odlévání 750 °C (teplota přehřátí X °C) je maximální dilatace 0,15 [mm] a při teplotě lití 660 °C je dilatace pouze 0,13 [mm].

Experimenty se slitinou AlSi12 (téměř eutektické složení) nepřinesly také očekávané výsledky dilatací. Jak je z grafické závislosti dilatace na čase zřejmé, největší hodnotu dilatace vykazuje slitina AlSi12 odlévána z teploty 730 °C. Křivka této dilatace nevykazuje úplně hladký průběh v celém rozsahu. Zprvu je nárůst hlatky, dosahuje hodnotu dilatace 0,22 [mm], avšak v okamžiku 630 [s] po odlití je náhlý nárůst dilatace až hodnotu 0,35 [mm] s dalším postupným poklesem a v okamžiku 1220 [s] opět mírný skokový nárůst dilatace, avšak již jen na hodnotu 0,17 [mm]. To lze vysvětlit závadou na křemenné trubičce, která slouží jako měřicí čidlo dilatací. Při teplotě lití 790 °C slitina AlSi12 vykazuje postupný plynulý nárůst dilatací až na maximální hodnotu 0,11 [mm], pak následuje pozvolný pokles. Při odlévání z teploty 630 °C je nejdříve viditelný mírný pokles dilatace (nepatrné smrštění), avšak v další fázi následuje růst dilatace až na hodnotu 0,09 [mm] s následným poklesem. Z této závislosti je patrné výsledné smrštění cca 0,1 [mm].

Podobný charakter je patrný i u slitiny AlSi15. I zde je nižší dilatace při teplotě lití 820 °C než při teplotě 770 °C. Maximální dilatace je u slitiny s teplotou lití 770 °C a dosahuje hodnotu 0,27 [mm], pak následuje pokles dilatace. Dilatace slitiny s teplotou lití 820 °C dosahuje maximální hodnotu 0,19 [mm]. Při teplotě lití 670 °C je maximum dilatace 0,17 [mm], pak následuje pokles dilatace. Výsledná dilatace je v tomto případě téměř rovna 0.

5. ZÁVĚR

Úkolem diplomové práce bylo sledování rozměrových změn během tuhnutí odlitků ze slitin hliníku.

Práce je rozdělena do dvou základních částí. Na část rešeršní a část experimentální. V části rešeršní jsou charakterizovány slévárenské slitiny hliníku a procesy dilatace ve všech okamžicích utváření odlitku ve slévárenské formě. Hlavní - experimentální část diplomové práce se zabývá sledováním dilatací slitin hliníku (AlSi3, AlSi7, AlSi12, a AlSi15) při odlévání odlitku tvaru válce $\varnothing 60 \times 70$ mm do pískové formy z CT směsi vytvrzené profouknutím CO_2 .

K tomuto účelu bylo použito měřicí zařízení, které je k dispozici na KSP-FS TU v Liberci, jehož základem je dilatometr polské provenience. Současně byly odlity zkušební odlitky podle zkoušky dle Tatura. Tato zkouška měla ukázat vznik a charakter stažení na odlitku typického tvaru, viz obr. 3-25.

Výsledky experimentů lze shrnout do těchto dílčích závěrů:

1. Dilatace odlitku není přímo úměrná teplotě lité. Lze však zjistit v určitých úsecích teplot lité přímou závislost dilatace na této teplotě lité.
2. Při vyšších teplotách lité narůstají rozměry odlitků z možného důvodů uvolněného tepla z vnitřních partií odlitku které přestupuje do vnější ztuhlé povrchové slupky, které zapříčiní její opětovný ohřev a s tím související narůst délkových rozměrů odlitku.
3. Při početním řešení průběhu a hodnoty dilatace v daném okamžiku se průběh křivky shodoval s průběhem naměřených křivek.
4. Maximální hodnota dilatace a její čas vzniku závislí na tloušťce ztuhlé stěny a rozdílu mezi teplotou tekutého kovu a teplotou stěny.
5. Není patrna žádná výrazná závislost vzniku stažení na teplotě přehřátí.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Ptáček L. a kolektiv: Nauka o materiálu 1.
Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno 2003
- [2] Příbyl J.: Pnutí v odlitcích. SNTL Praha 1973.
- [3] Příbyl J., Beneš J.: Slévárenství 3. SNTL Praha 1967.
- [4] Nová I.: Tepelné procesy ve slévárenských formách. TU v Liberci 2002
- [5] Hošek Z.: Lineární a objemové změny hliníkových slitin
[Teze doktorandské práce]. TU FS Liberec
- [7] Valecký J. a kolektiv: Lití kovů pod tlakem. SNTL Praha 1963
- [6] Vetiška A. a kolektiv: Teoretické základy slévárenské technologie.
SNTL Praha 1974
- [8] Dobrzański L. A.: Metaloznawstwo z podstawami nauki o materiałach.
WNT Warszawa 1999 [9]
- [10] Gregoraszczyk M.: Maszynoznawstwo odlewnicze. AGH Kraków 2002
- [11] Perzyk M. a kolektiv: Odlewnictwo. WNT Warszawa 2004
- [12] Pižl J.: Diplomová práce. TU v Liberci – FS, 2002